Glifosato: l'erbicida più usato del mondo è cancerogeno?

Febbraio 2018 € 4,90

Le Scienze

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

La frontiera del gene drive

Una nuova tecnica di ingegneria genetica potrebbe eliminare la malaria e salvare le specie a rischio, ma solleva importanti questioni etiche

Fisica

Ultime notizie dallo zoo delle particelle esotiche

Clima

Il ruolo delle nuvole nel riscaldamento globale

POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003 CONV. L. 46/2004, ART. 1, C. 1, DCB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 594 - 1 FEBBRAIO 2018

IN COPERTINA

Il gene drive diffonde modifiche genetiche a tutti gli individui di una popolazione; potrebbe essere uno strumento assai utile negli ambiti della conservazione e della sanità pubblica, ma è anche molto controverso. (Alfred Pasieka/SPL/AGF)

Sommario

Febbraio 2018 numero 594

38

Annie Green/Artmytage/Alamy

Sommario

14

17

91

Rubriche

SCIENZA NEWS

Chromorange/Dieter/AGF (*fringuelli delle Galápagos*); BlackJack3D/iStock (*pianeta*); winvic/iStock (*meringhe*)

di Marco Cattaneo

Invertire la rotta

La comunità scientifica può evitare lo schianto del paese

Ve la ricordate la strategia di Lisbona? No? Rinfreschiamoci la memoria. Nel 2000 il Consiglio Europeo di Lisbona approvò un programma di riforme in cui, tra l'altro, entro il 2010 l'Europa avrebbe dovuto diventare «l'economia basata sulla conoscenza più competitiva e dinamica del mondo». Oltre a misure per l'istruzione e la formazione, uno degli obiettivi (stabilito in realtà a Barcellona due anni più tardi) era di incrementare gli investimenti in ricerca e sviluppo con l'intento di raggiungere il 3 per cento del PIL entro il 2010.

Ebbene, questi investimenti in Italia si aggirano intorno all'1,2 per cento. Rispetto agli obiettivi europei, *not even close*: nemmeno vicino. Qualcuno dice che è la crisi. Ma la crisi, la grande recessione globale, è stata dieci anni fa. E nel frattempo gli altri paesi si sono organizzati. Come? Investendo di più in ricerca e sviluppo. Secondo i dati 2015 dell'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico, la Francia era al 2,2 per cento, gli Stati Uniti al 2,8, la Germania al 2,9. E stendiamo un velo pietoso sui numeri di Giappone, Israele, Corea del Sud.

Peggio, sempre nel 2015 l'Italia contava 4,73 ricercatori ogni 1000 abitanti, contro una media europea di 7,4. Non è un caso, dunque, che il rapporto 2017 del World Economic Forum ci collochi al 106° posto su 137 paesi esaminati per capacità di trattenere talenti e al 104° posto per capacità di attrarre talenti. Poi uno dice la fuga dei cervelli...

E no, non è finita qui. Perché, come dicevamo nell'editoriale di dicembre, il fondo ordinario degli enti di ricerca basta a malapena a coprire salari e spese strutturali. E i pochi fondi a disposizione (PRIN e FIRB) per progetti di ricerca sono andati erodendosi negli anni fino a poche decine di milioni di euro (con l'eccezione del bando per i PRIN 2017 approvato il 27 dicembre scorso per 391 milioni).

Ci sarebbero i fondi europei, che potrebbero dare un notevole sostegno ai nostri investimenti. Ma, come ha raccontato Silvia Bencivelli su queste pagine nel settembre 2016, i PON 2007-2013 – che avrebbero dovuto dare ossigeno soprattutto alle università e agli enti di ricerca del Sud – sono stati assegnati con criteri quantomeno opachi.

Ma c'è di più. Il ciclo di finanziamenti 2007-2013 sarebbe terminato da oltre quattro anni, ma non si è ancora concluso. E la mancata chiusura della rendicontazione dell'attività finanziaria all'Europa blocca le erogazioni di fondi per il periodo successivo, il 2014-2020. In verità, non sono state nemmeno erogate alcune somme dovute per la rendicontazione di progetti PON relativi al periodo 2000-2006. Tutto questo ci costerà probabilmente la restituzione di una parte dei fondi. E dove andrà a gravare? Beh, ma sui prossimi finanziamenti europei, ovviamente.

BraunS/iStock

Di queste vicende e di molto altro parla Roberto Defez in *Scoperta. Come la ricerca scientifica può aiutare a cambiare l'Italia*, il libro che trovate in edicola con questo numero di «Le Scienze», un tentativo di sferzare la politica, ma anche la comunità scientifica, perché l'Italia inverta la rotta prima di schiantarsi definitivamente.

Viaggiare tra ieri, oggi e domani

A richiesta con il numero di marzo, *Viaggi nel tempo*, un libro di James Gleick

Che cosa sia il tempo, nessuno lo sa. O meglio, tutti riconosciamo nel tempo un fluire di eventi spesso quotidiani, ma è un riconoscimento istintivo che non aiuta la scienza a stabilire una volta per tutte la natura profonda del passaggio tra ieri, oggi e domani. Più gli scienziati osservano da vicino questo fluire, più si smaterializza sotto i loro occhi: oggi nelle equazioni fondamentali della fisica il tempo scompare. La sua profonda natura, dunque, è ancora sfuggente, pur essendo un argomento di riflessione fin dai tempi dell'antica Grecia e dei suoi filosofi.

Questo però non ha impedito a scrittori, poeti e artisti di fantasticare sui viaggi nella dimensione temporale né ha impedito agli stessi scienziati di effettuare esperimenti mentali, cioè esperimenti non empirici ma pure speculazioni teoriche, sui viaggi nel tempo. Anzi, spesso tra fantascienza e scienza c'è stato un proficuo scambio di idee, come illustra James Gleick nel libro allegato a richiesta con il numero di marzo di «Le Scienze» e in vendita nelle librerie per Codice Edizioni, e il cui titolo non può che essere *Viaggi nel tempo*.

La porta di ingresso del libro, che immerge il lettore in un fluire di narrazioni filosofico-letterarie e concetti scientifici, è la fine del XIX secolo, quando lo scrittore britannico H.G. Wells pubblicò il romanzo *La macchina del tempo* (1895).

Era un'epoca di sconvolgimenti sociali alimentati da uno sviluppo tecnologico senza precedenti nella storia dell'umanità. I mutamenti riguardavano anche la visione del tempo; in pochissime generazioni si stava passando dalla circolarità temporale, che aveva caratterizzato per millenni le società umane basate prevalentemente su agricoltura e caccia, alla temporalità lineare, progressiva e senza sosta, della nascente civiltà industriale. In quel mondo che vedeva la luce, ieri, oggi e domani avrebbero riservato realtà diverse, ed era un mondo opposto a quello segnato dalla ripetitività delle stagioni. Wells, dunque, aveva respirato lo spirito del tempo e lo aveva trasposto, tra i primi a farlo, nel mondo della fantasia.

Ma anche la scienza non avrebbe tardato ad arrivare. Nel 1908, ricorda Gleick, il matematico Hermann Minkowski annunciò un'idea rivoluzionaria: spazio e tempo considerati isolatamente sono destinati a dissolversi in ombre, solo una loro unione può conservare una realtà indipendente. Proprio il risultato che avrebbe ottenuto nello stesso periodo il fisico Albert Einstein con una la sua teoria della relatività e il suo spazio-tempo. Dunque se possiamo muoverci nello spazio, che è collegato al tempo, perché non viaggiare avanti e indietro in quest'ultimo, come lungo una linea? Il dado era tratto.

Negli anni e nei secoli successivi, i viaggi temporali avrebbero solleticato la fantasia di scrittori e scienziati, e in effetti il libro di Gleick è una sorta di viaggio parallelo all'indietro nel tempo con riferimenti a ricercatori, artisti e filosofi che si sono cimentati e ancora oggi si cimentano con uno dei temi più affascinanti che la mente umana possa investigare. Dopotutto, il tempo potrebbe essere benissimo un'illusione partorita proprio dalla nostra mente, e che ha catturato persone dal calibro di Aristotele, Platone, Jorge Luis Borges, Marcel Proust, Italo Calvino, Erwin Schroendiger, David Foster Wallace e molti altri ancora, oltre a quelli già nominati in precedenza.

Impossibile fare una lista esaustiva dei personaggi, delle opere e delle scoperte scientifiche citati da Gleick, il quale riflette anche sul tempo nell'era di Internet, una tecnologia che potrebbe farci riconsiderare ancora una volta il nostro riconoscimento del fluire degli eventi. L'unico modo per viaggiare con Gleick è immergersi nelle pagine del suo libro, in cui c'è anche la risposta alla nostra necessità dei viaggi nel tempo.

ChakisAtelier/iStock

di Roberta Villa

Nuove risposte sull'HIV

Una domanda che potrebbe scardinare il virus responsabile dell'AIDS potrebbe iniziare ad avere qualche risposta, spiega l'immunologo Guido Silvestri

Tra la fine degli anni ottanta e primi anni novanta, quando esplose l'AIDS, Guido Silvestri era un giovane immunologo all'Ospedale Torrette di Ancona. L'epidemia colpiva soprattutto i suoi coetanei, con un decorso inarrestabile davanti al quale i colleghi più esperti erano impotenti quanto quelli alle prime armi.

L'occasione di varcare l'oceano verso i più importanti centri di ricerca del mondo lo spinse a deporre il camice per cercare al bancone di laboratorio un altro modo di affrontare la malattia. Davanti alla colonia di primati dell'Emory University di Atlanta, Silvestri si pose la domanda che ancora oggi ritiene possa scardinare la forza dell'HIV: perché gli esseri umani e i macachi soccombono alla malattia, mentre le scimmie africane convivono tranquillamente con il Simian Immunodeficiency Virus (SIV), da cui l'HIV deriva? Dopo vent'anni di lavoro, uno studio pubblicato su «Nature» apre nuove possibilità di risposte.

CNRI/Science Photo Library CNRI/SPL/AGF (*virus al microscopio*); Tek Image/SPL/AGF (*test HIV*)

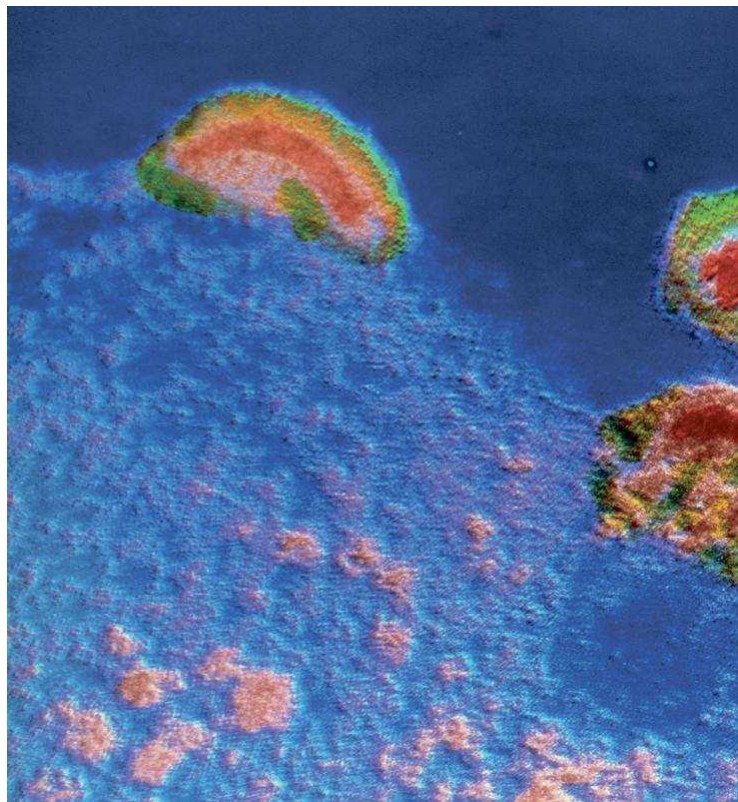
Un bel modo per festeggiare questo anniversario. Professor Silvestri, c'è una continuità in questo lavoro?

In un certo senso sì. Cercando risposte a quella prima domanda, la prima sorpresa è stata scoprire che la differenza tra esseri umani e scimmie africane nella risposta alla malattia non dipendeva dal fatto che il sistema immunitario teneva a bada l'infezione, come si poteva ipotizzare. Anzi, in questi animali il virus si replica tranquillamente e le difese dell'organismo non risultano attivate. Eppure non ci sono sintomi e l'infezione non passa da madre a figlio durante la gravidanza e il parto.

È il contrario di quel che accade nei macachi e negli esseri umani, dove sono proprio la depressione del sistema immunitario e l'entità della carica virale a determinare la progressione della malattia. Come spesso accade nella scienza, quindi, una prima risposta ha aperto nuove domande.

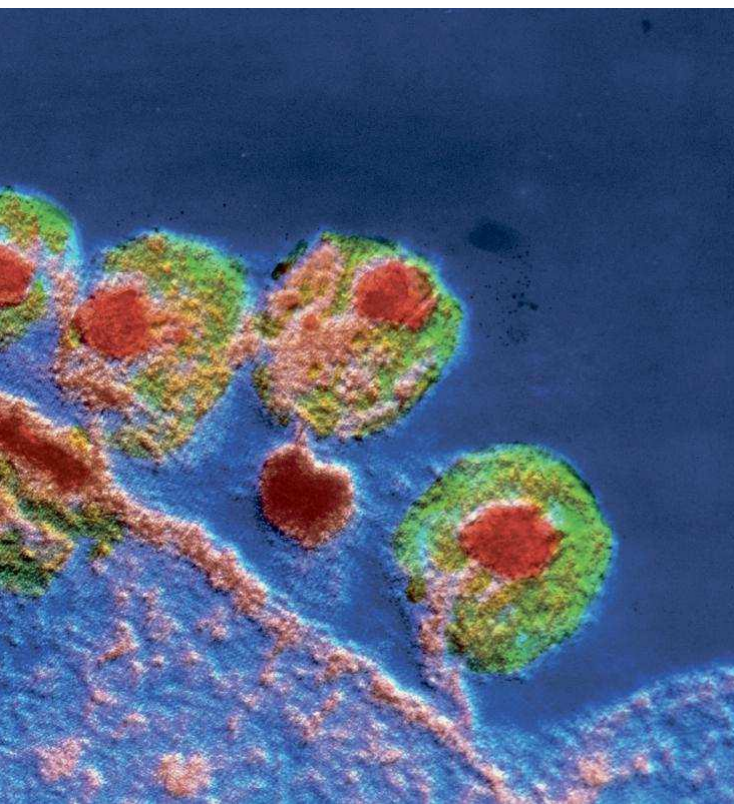
Qual è stato il passo successivo?

Nel 2011 abbiamo aggiunto un altro tassello al quadro, dimostrando che il virus delle scimmie è capace come l'HIV di infettare le cellule e trasmettersi da un individuo a un altro, ma tende a colpire i linfociti CD4, cioè i globuli bianchi responsabili della risposta cellulare, in una fase più avanzata della loro differenziazione, quando cioè sono già, per così dire, schierati sul campo. Il virus dell'AIDS, invece, nei macachi e negli esseri umani, infetta preferibilmente le cellule più indifferenziate, quelle che costituiscono la memoria immunologica dell'individuo e restano quiescenti, in attesa che si ripresenti uno stimolo già incontrato in precedenza, per sferrare una difesa più efficace.

In cosa consiste la nuova scoperta che ha ottenuto l'attenzione di «Nature»?

CHI È

Dopo la laurea ad Ancona e la specializzazione in immunologia clinica, nel 1993 Guido Silvestri ottiene dall'Istituto superiore di sanità una borsa di studio per completare la sua formazione prima a Montreal, in Canada, e poi agli NIH di Bethesda, negli Stati Uniti.

Alla fine degli anni novanta, alla Emory University di Atlanta, comincia a cercare nelle scimmie una chiave per affrontare l'emergente epidemia di AIDS, ottenendo importanti risultati scientifici che lo hanno reso uno dei massimi esperti al mondo in questo campo.

Attualmente è Eminent Scholar della Georgia Research Alliance, professore ordinario di patologia alla Emory University di Atlanta e direttore della divisione di microbiologia e immunologia allo Yerkes National Primate Research Center.

Al microscopio. Particelle di HIV (*rosso*) escono da un linfocita T4, una delle cellule che compongono il nostro sistema immunitario, in un'immagine ottenuta con un microscopio elettronico a trasmissione. Nella pagina a fronte, test per il virus dell'AIDS.

Cortesia Silvestri (*Silvestri*)

Per trovare nuovi indizi dovevamo andare all'origine delle differenze genetiche tra questi animali, i macachi e gli esseri umani, un lavoro che ha richiesto il sequenziamento completo del DNA di una scimmia africana, il cercocebo. Dal confronto tra il suo patrimonio genetico con quello di altri primati, tra cui macachi ed esseri umani, abbiamo individuato nella nostra scimmia africana due varianti geniche, in particolare, che potevano essere implicate nel diverso comportamento di questi animali rispetto all'infezione: *ICAM2* e *TLR4*. Quest'ultimo gene, che produce un recettore che attraversa tutta la membrana cellulare (*toll-like receptor*), fondamentale per la risposta immunitaria, nei cercocebi ha una «coda citoplasmatica», cioè la parte che si prolunga all'interno della cellula, molto più lunga rispetto a esseri umani e macachi.

Quale significato può avere questa differenza?

Per scoprirlo abbiamo creato proteine «chimeriche», che unissero cioè «testa» della proteina TLR4 del macaco e «coda» di quelle dei cercocebi e viceversa. Così abbiamo dimostrato che la presenza della «lunga coda» tipica delle cellule della scimmia africana si associa a una minor produzione di mediatori dell'infiammazione rispetto a quello che accade nei macachi e nella nostra specie. Come questo influisca sul diverso andamento dell'infezione da SIV e da HIV è ancora da chiarire, ma è probabile che sia coinvolta un'alterazione del microbioma intestinale e il passaggio in circolo di batteri intestinali che alimenta l'infiammazione cronica.

Lei è coinvolto anche in progetti per la messa a punto di vaccini contro l'HIV, un obiettivo che continua a eludere gli scienziati. A che punto siamo?

Forse abbiamo trovato una strada più promettente di quelle seguite in passato. Tra il 2007 e il 2015 sono stati individuati particolari anticorpi (i *broadly neutralizing antibodies*, in sigla bNAbs) capaci di bloccare quasi tutti i ceppi di virus. Infusi nei macachi, proteggono dall'infezione. Ora la difficoltà sta nell'individuare le componenti del rivestimento (*envelope*) del virus capaci di indurne la sintesi, e riuscire a farli produrre al nostro sistema immunitario. Anche così, bisognerà poi vedere se questa protezione persiste, e per quanto tempo. Insomma, c'è ancora molto lavoro da fare.

Molto di questo lavoro implica la sperimentazione animale sui primati. Come vive questo aspetto della sua ricerca?

Rispettiamo le severissime norme che regolano questo aspetto del nostro lavoro, garantendo agli animali le migliori condizioni di vita e il minor grado di sofferenza possibile. Stabilire se sia lecito o no sacrificare decine o centinaia di scimmie nel mondo per salvare milioni di vite umane è una scelta politica. La mia personale opinione è che lo sia, tuttavia se la legge, che ha limitato la ricerca sugli scimpanzé, dovesse estendersi ad altri primati, a malincuore, ma mi adatterei.

Negli ultimi mesi lei è sceso in campo attivamente in Italia, impegnandosi di persona a difesa della scienza, soprattutto nei confronti dei movimenti antivaccinisti. Che cosa l'ha spinta a farlo?

Noi scienziati non possiamo continuare a stare chiusi nella nostre torre d'avorio, come si dice. Dobbiamo dialogare con la società se vogliamo ristabilire la fiducia del pubblico indispensabile per sostenere il nostro lavoro e permettere poi di applicarne i risultati. Credo quindi che tutti dovremmo dedicare una piccola parte del nostro tempo a questa missione, che reputo indispensabile per evitare di ritrovarci periodicamente in situazioni di crisi come quelle che negli ultimi anni si sono concretizzate nel caso Stamina o, appunto, nella crescita dei movimenti antivax.

di Letizia Gabaglio

Una lampada da geni

Politronica lavora sui nanomateriali per la stampa 3D e insieme ad altri centri del settore ha sviluppato una lampada che è anche una stampante tridimensionale

Nel suo discorso sullo stato dell'Unione nel 2013, Barack Obama parlò esplicitamente di stampa 3D e della rivoluzione industriale prossima ventura: una rete di *hub* che a partire da New York si sarebbe dovuta sviluppare per tutta la nazione consentendo una produzione manifatturiera *just in time* e a chilometro zero.

Cose che possono accadere solo dall'altra parte dell'Oceano, potrebbe pensare qualcuno. A smentire i pessimisti è invece arrivata una *start-up* di Torino, per la precisione uno *spin-off* del Politecnico di Torino, che ha creato la prima fabbrica diffusa 4.0, ovvero 30 centri di stampa 3D sparsi in Italia settentrionale pronti a produrre in maniera decentralizzata e a portare sul mercato il primo oggetto fabbricato in questo modo, una lampada che è anche una stampante 3D. Ma facciamo un passo indietro.

Una fabbrica diffusa

Politronica, questo il nome dell'azienda innovativa italiana, nasce nel 2008 dall'idea di un gruppo di ingegneri e chimici del Politecnico di Torino impegnati nello sviluppo di soluzioni per la stampa funzionale e di inchiostri conduttivi. Il primo brevetto riguarda infatti un inchiostro a base di argento e arriva nel 2010, e negli anni successivi i ricercatori lavorano allo sviluppo di inchiostri a base di nanoparticelle nell'ambito del progetto europeo Inknojet e propongono un nuovo metodo per ottenere pigmenti economici e facili da usare.

Un lavoro che vale loro diversi riconoscimenti e l'inizio di una partnership con l'Istituto italiano di tecnologia per la messa in commercio di nuovi inchiostri, pensati in particolare per le applicazioni spaziali. Ma è nel 2014 che comincia a farsi strada l'idea che porterà Politronica alla creazione della prima fabbrica diffusa. «Ci siamo ispirati al progetto Reprap, l'idea cioè di poter sviluppare macchine che si costruiscono da sole, iniziando con le stampanti 3D. Così abbiamo ingegnerizzato una stampante a estrusione e nel 2016 l'abbiamo messa in vetrina, nel centro di Torino, per capire quale fosse la reazione del pubblico», spiega Alessandra Rosa, responsabile della comunicazione di Politronica. In questo modo i giovani del Politecnico cominciano ad attirare intorno al loro progetto persone interessate a investire e scommettere su questa tecnologia al di là del facile entusiasmo. Ed è a questo punto che il discorso di Obama comincia a dare i suoi frutti.

«Abbiamo pensato di coinvolgere alcuni centri di stampa digitale e di dare la nostra stampante in comodato d'uso con l'accordo che, una volta formati gli operatori, queste macchine dovessero essere usate in progetti comuni per una percentuale di tempo», va avanti Rosa. «Così abbiamo coinvolto una trentina di centri e creato la prima fabbrica diffusa italiana, Qubit3D.» In questo modo si abbattono i costi marginali e quelli di consegna. Allo stesso tempo, però, la giovane azienda torinese deve fare i conti con un mercato in evoluzione: la tecnologia avanza a ritmo sostenuto e le stampanti a estrusione, come quella messa a punto da Politronica, non sono più l'unica opzione accessibile, oggi anche tecniche più avanzate come quelle che usano il laser cominciano a diventare competitive. Così, mentre Politronica inizia a dialogare con le aziende del Polo della meccatronica che ha base a Torino e inizia a capire quali siano le difficoltà da affrontare, incontra Flying Tiger Copenhagen, l'azienda danese famosa per aver portato in tutto il mondo oggetti di design alla portata di chiunque.

«Le nostre strade si sono incrociate nel momento più giusto, quando avevamo capito che le macchine a estrusione non potevano essere più proposte per uso professionale», spiega Rosa. «Ma l'entusiasmo che Tiger ha manifestato per la nostra realtà ci ha dato un nuovo slancio e ci siamo immersi in questa sfida». In sei mesi di lavoro intenso, il gruppo dello spin-off – che nel frattempo si è allargato e comprende *designer*, esperti di comunicazione e di marketing - ha sviluppato una stampante 3D giocattolo che

LA SCHEDA

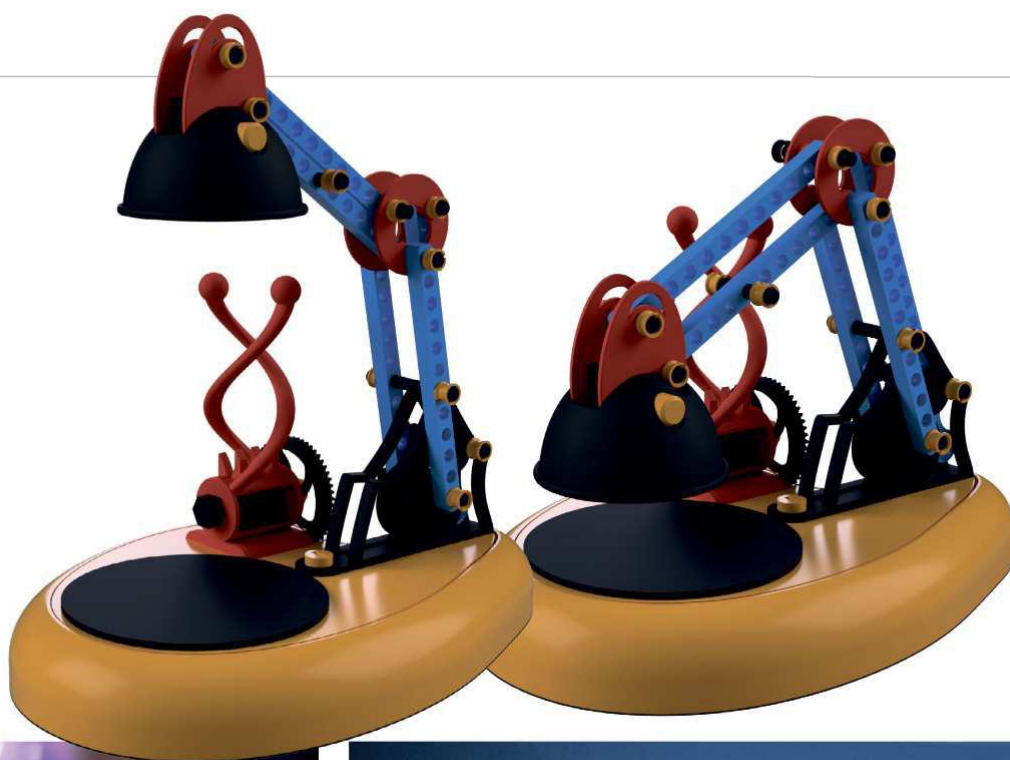
Politronica

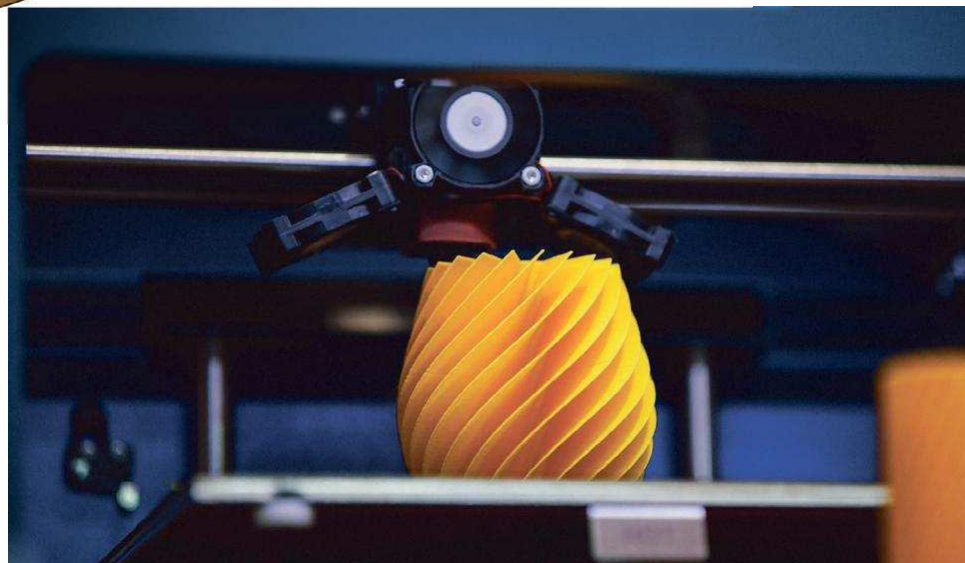
Fatturato
150.000 euro

Investimenti in ricerca
75 per cento del fatturato

Dipendenti/collaboratori
3/12

Brevetti rilasciati
1 + 1 in licenza esclusiva

Hero Images/Getty Images

Stampare in tre dimensioni. La lampada q3d, prodotta da Politronica. Sotto, altre due tipologie di stampanti tridimensionali.

serts/iStock (*stampante*); cortesia Politronica (*q3d*)

in totale continuità con i prodotti in vendita da Tiger è un oggetto di design (in realtà è anche una lampada funzionante), è venduta in un kit pronta per essere montata, e ha un prezzo accessibile (un centinaio di euro). «L'estetica della lampada q3d si ispira al lavoro dell'artista statunitense Alexander Calder, in particolare a un alfabeto di forme a cui ci si è riferiti per "tradurre" le sagome delle componenti plastiche», dice ancora Rosa. «Il design ha preso a sua volta ispirazione dall'iconica lampada LUXO L-1 realizzata nel 1937 dal designer norvegese Jac Jacobsen e destinata a essere uno degli oggetti più riprodotti nella storia del design, fino a diventare la mascotte degli studi Pixar Animation».

Il braccio della stampante è mosso con precisione da fili ed elastici che interagiscono con la rotazione del piatto: in questo modo, per la prima volta nella storia della robotica, geometria delta (una particolare geometria con cui lavorano le stampanti 3D) e geometria polare si combinano in un solo oggetto. L'elettronica della q3d ha il suo cuore nell'italianissima Arduino e presenta un *firmware* ottimizzato, basato su librerie *open source*. Ma la vera innovazione è nella tecnica di stampa: come una qualsiasi stampante 3D con tecnologia FDM estrude materiale, ma non si tratta di plastica fusa bensì di una resina polimerica che, a differenza delle resine foto reticolanti finora usate nell'ambito della stampa 3D, indurisce con la luce bianca emessa da una normale lampadina a LED. Ecco quindi svelato il «trucco»: q3d può essere usata anche come lampada da tavolo. Ma la ricerca non si ferma e i giovani usciti dal Politecnico stanno mettendo a punto un «pantografo virtuale» che, grazie alla realtà aumentata, permetterà agli utenti di sperimentare tecniche di modellazione semplici e intuitive, sviluppate a partire dalla movimentazione antropomorfa del braccio di stampa di q3d. «Il nostro obiettivo è permettere a giovani utenti di sperimentare, sin dall'assemblaggio, una robotica funzionale alla produzione digitale di oggetti», conclude Rosa.

Inutile dire che la stampante-lampada è prodotta all'interno di Qubit3D, la fabbrica 4.0 diffusa che produce secondo criteri di sostenibilità ambientale ed efficienza produttiva in *just in time* a chilometro zero. Chissà se Obama ne comprerà una.

di Telmo Pievani
è professore ordinario di filosofia delle scienze biologiche
dell'Università degli Studi di Padova

Le due facce dell'evoluzione

Genetica ed ecologia insieme spiegano come e perché le specie si moltiplicano

La saga scientifica dei Grant continua. Dopo quarant'anni passati in tendina su isolette e scogli delle Galápagos, anziché divorziare, i coniugi naturalisti di Princeton nel 2006 avevano annunciato su «Nature» insieme a colleghi genetisti di Harvard di aver scoperto la modalità di regolazione genica dello sviluppo del becco dei fringuelli delle Galápagos. Poi, tre anni fa, Peter e Rosemary hanno collaborato a uno studio esemplare, coordinato dall'Università di Uppsala, in cui è stato sequenziato il genoma di 120 esemplari rappresentativi di tutte le 14 specie del gruppo, ricostruendo la filogenesi molecolare di questi uccelli divenuti ormai icona degli studi evoluzionistici.

In un bellissimo articolo di approfondimento pubblicato a marzo 2017 su «Science», forti dell'esperienza sul campo, i due spiegavano un concetto centrale della biologia evoluzionistica: per capire come le specie si moltiplicano, bisogna usare la genetica; per capire perché si moltiplicano, bisogna conoscere ecologia e comportamento. L'evoluzione è un processo che avviene a più livelli e solo incrociando dati molecolari ed ecologici si può comprenderla appieno. Il nocciolo teorico più profondo della teoria neodarwiniana risiede oggi proprio nell'intreccio tra cambiamenti genetici e cambiamenti ecologici, e nel far dialogare questi due linguaggi diversi. Detto più precisamente: quali sono le sorgenti della variazione genetica e come nuovi fenotipi si diversificano in risposta al mutare dell'ambiente?

Nel caso dei fringuelli, sul lato molecolare noi oggi conosciamo uno per uno i sette geni responsabili della forma e delle dimensioni dei becchi, i loro profili di espressione, e come gli alleli (le due versioni alternative di uno stesso gene) variano di frequenza sia tra le diverse specie sia tra le popolazioni entro ciascuna specie. Sul lato ecologico, marcando per generazioni centinaia di esemplari e osservandone i comportamenti, il successo riproduttivo differenziale e le capacità di sopravvivenza, possiamo misurare gli effetti delle pressioni selettive dovute a cambiamenti ambientali (siccità, tipi di cibo disponibile, presenza o assenza di specie competitrici e così via).

Quando una popolazione inizia a divergere, è il momento *clou*. Unendo genetica ed ecologia, associamo un evento selettivo (per esempio una fluttuazione climatica che genera un periodo di forte siccità) al variare di frequenza di un certo allele, e oggi addirittura ai minutissimi processi molecolari (mutazioni singole o multiple, inversioni, elementi trasponibili, introgressioni genetiche, trasferimento genico orizzontale, rilascio di variazione criptica in nuovi ambienti e altro ancora) che hanno generato la variazione genetica sottostante alla variazione fenotipica sotto selezione.

Dalle oscillazioni del clima globale a una singola mutazione magari avvenuta milioni di anni fa: in questa vertigine di scale di osservazione, la teoria dell'evoluzione dispiega oggi tutta la sua potenza esplicativa. Così i Grant ci hanno insegnato a vedere la speciazione mentre succede, scoprendo che in specie strettamente imparentate separatesi da poco la selezione agisce prevalentemente su una variazione preesistente (si fa di necessità virtù, usando geni simili), e che in almeno un caso, di nuovo sui fringuelli delle Galápagos, è bastato l'arrivo fortunoso di un singolo maschio immigrato sull'isola di Daphne Major per avviare la nascita di una nuova specie, in pochissime generazioni, per ibridazione, come i Grant hanno mostrato di recente su «Science». Già dallo studio genomico del 2015 era emerso che il frequente flusso genico poteva aver contribuito alla nascita di nuove specie di ascendenza mista. Ora il fenomeno è stato confermato dal vivo a livello ecologico.

Genetica ed ecologia hanno bisogno l'una dell'altra. E l'una può confermare o smentire le predizioni dell'altra. Per questo contributo scientifico i Grant meriterebbero il Nobel per l'evoluzione. Ma non esiste.

Sempre nuovi. Lo studio dei fringuelli delle Galápagos ha permesso di osservare la speciazione mentre avveniva nel giro di poche generazioni.

Chromorange/Dieter/AGF

di Edoardo Boncinelli
Università Vita-Salute San Raffaele, Milano

Bolle d'aria per attraversare l'inferno

Una specie di mosca riesce a vivere in un ambiente estremo grazie a un trucco

In questa rubrica voglio commentare una foto. Spesso le immagini dicono molto di più di un lungo discorso e possono rimanere ancora più facilmente impresse di quello. Consideriamo per esempio la mosca raffigurata in una foto eccezionale a p. 977 della rivista «Science» del 24 novembre 2017.

La mosca è della specie *Ephydra hians*, e vive sul lago Mono in California. Le acque di questo lago sono tre volte più salate di quelle dell'oceano e molto più alcaline. Ordinariamente il corpo degli esseri viventi di qualsiasi specie non è attrezzato per vivere in queste condizioni, a causa del tremendo effetto che le più elementari forze della chimica e della fisica vi eserciterebbero. La mosca di cui parliamo invece sembra a suo agio sulla superficie del lago salato e si tuffa in continuazione nelle sue acque raggiungendo anche i due metri di profondità.

Come fa? Foderandosi il corpo di bolle d'aria – anche se l'elevata concentrazione di sale ostacola proprio la formazione di bolle – che formano in questo modo una sorta di tuta o di scafandro. L'obiettivo è raggiunto grazie innumerevoli minuscoli uncini che spuntano dal suo corpo un po' dappertutto e trattengono piccole sacche d'aria. È ovvio che la disposizione degli uncini e la loro distribuzione deve essere disposta e organizzata fin dallo stato embrionale. A completamento del tutto, una vistosa secrezione di sostanze oleose cuticolari aiuta a mantenere in piedi il «castello» di piccolissime bolle d'aria che impedisce al corpo dell'insetto di venire direttamente a contatto con l'acqua, un'eventualità che sarebbe letale considerata la sua salinità e alcalinità.

Anche se non voglio pensare a come possa svolgersi un incontro galante in questa specie, non si può negare che la soluzione escogitata dalla natura sia all'altezza del problema incontrato: fasciarsi d'aria per attraversare l'inferno. Viene il capogiro a pensare a quante prove e prove fallite avranno affrontato gli antenati di questo insetto prima di trovare un assetto accettabile che soddisfacesse alcune condizioni poste dalla situazione. È evidente qui come non mai che una tendenza evolutiva è da rapportare alle condizioni di partenza e a quelle dell'ambiente circostante. Che senso avrebbe un marchingegno del genere in un ambiente non così particolare? E perché l'insetto deve per forza penetrare la barriera salina e raggiungere l'acqua? Data la situazione ci troviamo a osservare e apprezzare l'ingegnosità della natura, ovvero della spinta evolutiva, ma tutto questo poteva benissimo non essere, e ciò non avrebbe violato nessun principio universale, né qualcuno se ne sarebbe avuto a male.

Date le premesse, è una soluzione veramente brillante, ma non ha senso definirla la più brillante, né tantomeno l'unica. È il bello della vita che non si possa mai prevedere che cosa sarà domani, né che cosa dovrebbe necessariamente succedere. Perché la vita non è un dato di fatto sorretto e garantito da specifiche entità superiori o da leggi universali; deve anzi conquistarsi ogni giorno uno spazio e una legittimità.

Con lo scafandro. *Ephydra hians* e la bolla che permette a questo insetto di vivere nel lago californiano Mono, caratterizzato da un'acqua molto più alcalina di quella degli oceani.

Cortesia PNAS

Quando si afferma che la selezione naturale, o l'ambiente stesso, selezionano il più adatto, si commette un leggero arbitrio logico. Si assume cioè che gli esseri viventi ci debbano comunque essere, e che tra questi vengano scelti i più adatti. Tuttavia la premessa è sbagliata. Non c'è nessuna garanzia che di generazione in generazione e di secolo in secolo la vita debba esistere e continuare a esistere: non c'è che sperare e selezionare il meno disadattato a vivere, almeno in quello specifico ambiente! Il gioco fino a oggi è sempre riuscito, ma poteva anche non riuscire.

Dobbiamo essere tutti riconoscenti a questa mosca e al suo scafandro. Se lei ce la fa, è molto probabile che ce la faremo anche noi. E i nostri figli. Nonostante tutto.

di Piergiorgio Odifreddi
professore ordinario di logica matematica all'Università di Torino
e visiting professor alla Cornell University di Ithaca (New York)

Un principio rivoluzionario

Thomas Jefferson calcolò dopo quanto tempo dovrebbe decadere una costituzione

Nel 1776 Thomas Jefferson, futuro terzo presidente degli Stati Uniti, stese la prima versione della Dichiarazione di indipendenza, la cui approvazione al Congresso di Filadelfia sancì il 4 luglio la nascita degli Stati Uniti d'America. Jefferson non partecipò invece direttamente all'elaborazione della Costituzione, che venne approvata dalla Convenzione di Filadelfia nel 1787: come racconta il film di James Ivory *Jefferson in Paris* (1995), trascorse infatti i cinque anni tra il 1785 e il 1789 a Parigi, come diplomatico della nuova repubblica.

Pur dovendo guardare da lontano gli sviluppi della rivoluzione americana, Jefferson poté osservare da vicino lo scoppio della rivoluzione francese, e influenzare alcuni suoi protagonisti: il marchese Gilbert du Motier de La Fayette, in particolare, che aveva combattuto negli Stati Uniti come generale dell'esercito di George Washington, diventando il primo «eroe dei due mondi» della storia. Jefferson e La Fayette scrissero insieme la famosa Dichiarazione dei diritti dell'uomo e del cittadino, emanata dall'Assemblea nazionale il 26 agosto 1789, che non a caso ricalcava la Dichiarazione di indipendenza americana.

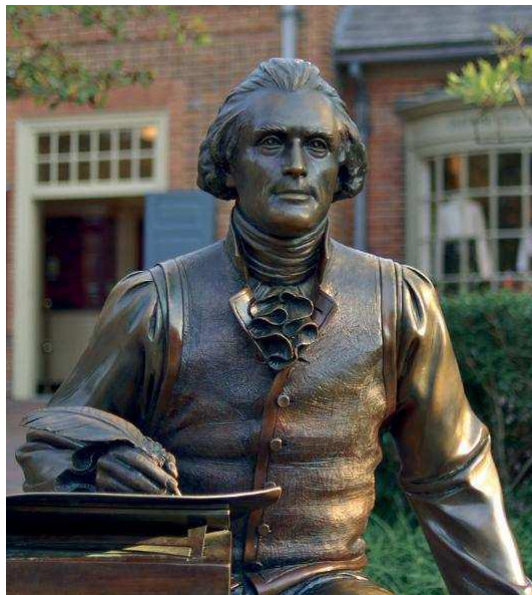
Jefferson fece ritorno negli Stati Uniti il mese successivo, e nell'attesa della partenza scrisse il 6 settembre una lettera a James Madison, futuro quarto presidente, in cui meditava sul ruolo della nuova Costituzione statunitense, che era stata ratificata e adottata da pochi mesi. Guardando come al solito lontano, egli enunciò in quell'occasione quello che divenne poi noto come il principio di Jefferson: «La Terra viene data in usufrutto ai viventi, e i morti non hanno poteri o diritti su di essa». E ne dedusse la conseguenza che «le costituzioni e le leggi dei predecessori si estinguono naturalmente insieme a coloro che le hanno emanate»: un concetto che venne poi recepito dalla Costituzione francese del 1791, secondo la quale «nessuna generazione ha il diritto di assoggettare alle proprie leggi le generazioni future».

Secondo Jefferson, le costituzioni nazionali devono estinguersi alla morte della generazione che le ha emanate.

Se si accettano il principio e le sue conseguenze, sorge il problema di stabilire il tempo di durata delle costituzioni, scaduto il quale dovrebbero automaticamente decadere e venire riscritte dalle nuove generazioni, in una sorta di «rivoluzione permanente» che abbatta periodicamente quello che le vecchie generazioni hanno costruito. Nella sua lettera Jefferson risolse il problema con un calcolo che anticipava i procedimenti di quella che diventerà in seguito la matematica attuariale, oggi comunemente usata per stipulare le assicurazioni sulla vita.

I dati su cui basò il suo calcolo li desunse da una delle prime tavole di mortalità, elaborata dal conte George-Louis Leclerc de Buffon, che classificava le età in cui erano morte circa 24.000 persone. Jefferson usò la tavola per stimare quella che oggi si chiama la vita mediana: cioè, l'età in cui una popolazione si dimezza, nel senso che metà degli abitanti muore prima di raggiungere quell'età, e l'altra metà dopo. Da non confondere con la vita media, che è invece la durata media di vita di una popolazione, ottenuta sommando le età di morte e dividendo per il numero dei morti. E nemmeno con la moda, che è l'età a cui muore il maggior numero di abitanti.

Istituendo un sistema di coordinate che ha come ascisse gli anni di età, e come ordinate il numero di persone che muoiono a una data età, la tavola di mortalità si riduce a una curva: la moda è il suo punto di massimo, la mediana è il punto in cui l'area viene divisa in due parti uguali, e la media è l'altezza di una curva costante che individua la stessa area. Jefferson calcolò la mediana della curva troncata sopra i 21 anni (la maggiore età di allora), che corrisponde al tempo in cui gli elettori si dimezzano, e scompare la maggioranza di quelli che hanno potuto partecipare alla ratifica della costituzione: poiché la mediana in Francia era sotto i 40 anni, suggerì dunque un periodo di decadenza della costituzione di 19 anni.

Ancora più semplice sarebbe stato considerare non la vita, ma l'età mediana della popolazione, che in Italia è oggi di 46 anni: dunque, metà della popolazione è nata dopo il 1972, è diventata maggiorenne dopo il 1990 e non ha potuto ratificare nessuna costituzione prima di quella data, mentre la nostra risale al 1948, due generazioni prima. Negli Stati Uniti invece, dove l'età mediana è di 38 anni, la ratifica della costituzione non dovrebbe essere precedente al 1998, mentre risale al 1789: l'anno della lettera di Jefferson, il cui vitale principio è rimasto lettera morta per più di 200 anni.

di Amedeo Balbi
Professore associato di astronomia e astrofisica presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma «Tor Vergata». Il suo ultimo libro è *Dove sono tutti quanti?* (Rizzoli, 2016)

La lotteria della vita

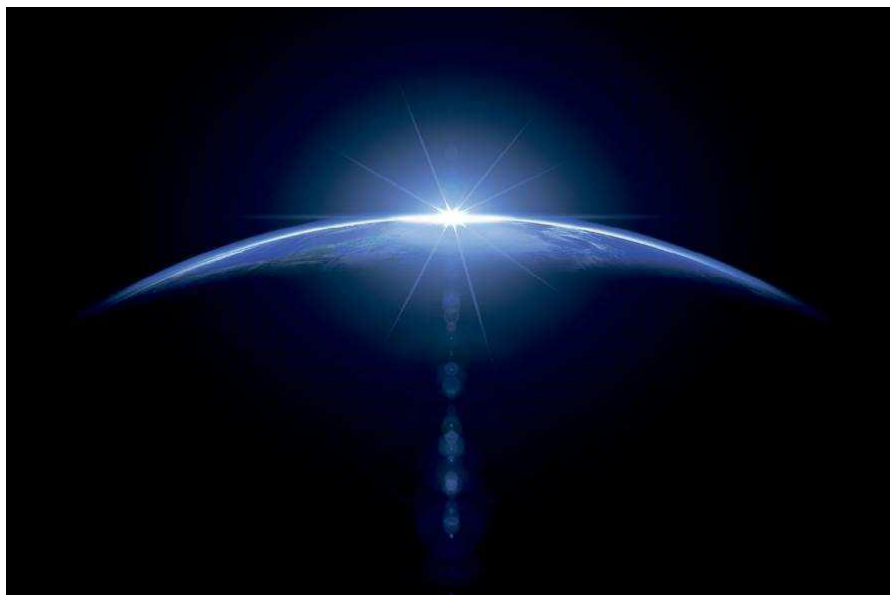
Come stimare senza esagerare la probabilità di altri mondi abitati nell'universo

Se si esamina la storia della vita sul nostro pianeta, uno degli aspetti che colpisce di più è la rapidità della sua comparsa. La datazione precisa è ancora soggetta a controversie, ma esistono indizi che i primi organismi unicellulari fossero già presenti sulla Terra attorno a quattro miliardi di anni fa, ovvero circa 500 milioni di anni dopo la formazione del pianeta: un tempo molto breve, su scala geologica. Non ci sono molti dubbi, comunque, sul fatto che la Terra fosse abitata 3,5 miliardi di anni fa, e ora uno studio pubblicato sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» indica che all'epoca i microrganismi esistenti erano già piuttosto differenziati: l'analisi di 11 fossili di archea (Archaea) venuti alla luce in una roccia australiana datata a 3,465 miliardi di anni fa mostra che apparterrebbero a specie che sfruttavano già la fotosintesi, che producevano metano, oppure che lo consumavano. Il che farebbe pensare che la vita, a quel punto, avesse già un bel po' di storia evolutiva alle spalle.

Si sarebbe tentati di concludere, come fa anche il primo autore dello studio, il paleobiologo J. William Schopf dell'Università della California a Los Angeles, che la vita appaia con relativa facilità, date le giuste condizioni, e che sia quindi molto diffusa nell'universo. È una tentazione che sembra andare d'accordo con l'intuizione: eventi improbabili accadono raramente, e viceversa. Nel 2002, uno studio di Charles Lineweaver, dell'Università del New South Wales di Sydney, e di Tamara Davis, della Macquarie University sempre di Sydney, pubblicato su «Astrobiology» aveva provato a dare all'intuizione una forma matematica più rigorosa.

Il punto di partenza era un parallelo con una lotteria quotidiana. Immaginiamo che, dopo un certo numero di giorni *N*, ci siano alcuni giocatori che hanno vinto tutti almeno una volta. Supponiamo ora che, scegliendo tra questi fortunati un giocatore a caso, risulti che abbia vinto dopo un numero di giorni molto più piccolo di *N*: ne dedurremmo che la probabilità di vittoria è piuttosto alta. Trasferendo l'analogia ai pianeti, Lineweaver e Davis calcolavano che il 13 per cento dei pianeti simili alla Terra, con almeno un miliardo di anni di età, potrebbero aver vinto la lotteria della vita.

Tuttavia quando si entra nel campo dell'inferenza statistica – ovvero quando si prova a generalizzare un risultato a partire da un campione parziale – bisogna andarci con i piedi di piombo. Soprattutto se, come nel nostro caso, il campione è costituito da un esemplare unico. In effetti, nel 2012 David Spiegel e Edwin Turner, entrambi della Princeton University, con una ricerca pubblicata sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» hanno dimostrato che in realtà dipende parecchio dalle nostre assunzioni.

In sostanza, affermano Spiegel e Turner, l'osservazione che la vita è apparsa molto presto sulla Terra è di per sé compatibile con probabilità molto basse che sia apparsa anche altrove nell'universo: se, a priori, attribuiamo alla comparsa della vita una probabilità piccola, essa non cambierà granché dopo averne constatato la rapida comparsa sul nostro pianeta. Il che ci ricorda quanto sia complicato trarre conclusioni solide da dati incompleti e consiglia di non farci trascinare dall'entusiasmo prima di avere le necessarie prove.

Soltanto uno. Trovare anche un solo altro caso di vita al di fuori della Terra sposterebbe decisamente l'ago della bilancia dalla parte di un cosmo ricco di pianeti abitati.

Allo stesso tempo, però, ci incoraggia a cercarle, queste prove: Spiegel e Turner dimostrano infatti che trovare anche un solo altro caso di vita fuori dal nostro pianeta sposterebbe decisamente l'ago della bilancia dalla parte di un universo pieno di altri mondi abitati, nel quale la Terra non sia il solitario vincitore di una lotteria dalle probabilità infinitamente basse.

di Giorgio Manzi
Insegna paleoantropologia presso il Dipartimento di biologia ambientale dell'Università «La Sapienza» di Roma, dove dirige il Museo di antropologia «Giuseppe Sergi»

L'anniversario di Homo antecessor

Nel 1997 fossili scoperti in Spagna venivano assegnati a una nuova specie umana

Vent'anni fa, si aggiungeva un nuovo ramo nella parte centrale del nostro albero evolutivo: un'ennesima specie estinta del genere *Homo*, quella che nel 1997 i miei colleghi spagnoli denominarono *Homo antecessor*. L'anno scorso, i tre direttori del progetto di scavi e ricerche nella Sierra de Atapuerca (Juan Luis Arsuaga, José María Bermudez de Castro ed Eudald Carbonell), insieme alla nuova direttrice del centro di studi sull'evoluzione umana che ha sede a Burgos (María Martinon-Torres), ne hanno celebrato il ventennale con un articolo di rassegna pubblicato su «Evolutionary Anthropology» dal titolo: *Twentieth anniversary of* Homo antecessor *(1997-2017), a review*.

Anche noi ne abbiamo parlato in questa rubrica, ma l'occasione è propizia per un aggiornamento. Possiamo iniziare dalla conclusione a cui arrivano Bermudez de Castro e gli altri nel loro articolo: «*... although* Homo antecessor *may represent a terminal lineage in western Eurasia, this species provides an opportunity to consider the morphology of the Last Common Ancestor [LCA]*». In altre parole, a differenza di quanto loro stessi avevano proposto vent'anni fa – ossia che questa specie fosse quella ancestrale alle successive, come per esempio siamo noi *Homo sapiens* o i Neanderthal – ammettono che *Homo antecessor* sia piuttosto da considerare il ramo terminale di una precedente radiazione adattativa, benché possa anche rappresentare un'approssimazione (o *proxy*, come si dice) alla morfologia della forma umana ancestrale, ossia al LCA.

Gli autori, a sostegno di quello che affermano e discutono, propongono una lunga tabella in cui compaiono in bell'ordine varie liste di caratteri, arcaici e derivati, che identificano *Homo antecessor* come una specie dalla combinazione unica di tratti morfologici, condivisi a mosaico con altre specie umane. La tabella si basa sugli oltre 160 reperti fossili – che includono resti ossei di vari distretti scheletri e dentari – venuti alla luce dallo strato TD6 della Gran Dolina di Atapuerca: una prima metà fra il 1994 e il 1996, nel corso del sondaggio di circa sei metri quadrati operato sul fianco del riempimento carsico che è ben visibile lungo la cosiddetta *Trinchera*, e un secondo lotto emerso nel corso di una sistematica regolarizzazione delle sezioni, operata fra il 2003 e il 2007, mentre gli scavi in estensione su tutto il riempimento della Gran Dolina proseguivano (e proseguono) a partire dai livelli più alti della stratigrafia.

La caratterizzazione arcaica della specie, combinata con altre considerazioni a carattere geografico e cronologico, oltre che alla luce delle informazioni che provengono dal cosiddetto «orologio molecolare», hanno portato i ricercatori spagnoli a suggerire che la nuova specie potesse essere il LCA. Tuttavia, con il passare del tempo, questa ipotesi è entrata in crisi. In alternativa, proprio in quegli stessi anni, il nome *Homo heidelbergensis* era stato recuperato per dare identità di specie a una varietà di fossili (fino a quel momento variamente denominati), compresi fra 600.000 e 200.000 anni fa circa, che sono distribuiti in Africa ed Eurasia. È in questo pezzo di strada dell'evoluzione umana (tecnicamente il Pleistocene medio) che un'umanità non più così arcaica come *Homo antecessor*, distribuita in aree geografiche vastissime, mostra una rinnovata tendenza a differenziarsi in varietà regionali e a sviluppare nuove tecnologie paleolitiche. Possiamo trovare qui le premesse per la comparsa delle forme umane che seguiranno.

Oggi molti di noi identificano questa fase cruciale dell'evoluzione umana con l'esistenza di un'unica specie, successiva in Europa a *Homo antecessor* – *Homo heidelbergensis*, appunto – e che rappresenta (questa sì) il LCA alla base della divergenza evolutiva fra noi, i Neanderthal e i non più tanto misteriosi «denisoviani».

Da Atapuerca. Una selezione dei fossili datati 800.000 anni fa e venuti alla luce nello strato TD6 della Grand Dolina poco più di vent'anni fa.

SPL/AGF

CLIMA

Più caldo farà, più rifugiati avremo

Rilevata una correlazione tra riscaldamento globale e richieste di asilo in Europa

In viaggio. Migranti nel deserto del Sahara in Niger diretti verso l'Algeria e poi, probabilmente, l'Unione Europea. Una ricerca ha stabilito un collegamento tra l'aumento medio delle temperature attualmente in corso in paesi dal clima temperato-caldo e numero di migranti da quegli stessi paesi arrivati in Europa.

Markus Matzel/ullstein bild via Getty Images

Gli shock climatici stanno già spingendo sempre più profughi verso l'Europa, e con gli aumenti delle temperature in corso le migrazioni si intensificheranno in modo drastico. Se le altre condizioni non cambieranno – in assenza cioè di adattamenti che riducano i danni climatici nei paesi d'origine, o viceversa di nuovi guai che li rendano ancor più instabili – entro fine secolo i flussi di richiedenti asilo verso l'Unione Europea cresceranno del 28 per cento negli scenari climatici più ottimistici, e saranno quasi triplicati in quelli più pessimistici.

Previsioni simili non sono nuove, ma questa è suffragata dalla più approfondita analisi mai effettuata in materia, presentata su «Science». Anouch Missirian e Wolfram Schlenker, della Columbia University di New York, hanno analizzato tutte le richieste d'asilo presentate nell'Unione Europea fra il 2000 e il 2014 da persone giunte da oltre 100 paesi (in media 351.000 richieste all'anno), indagandone la relazione con le condizioni climatiche di ciascun anno nei paesi d'origine.

«I richiedenti asilo erano solo un decimo degli immigrati in quel periodo, e non sappiamo se i nostri risultati valgano per i flussi migratori complessivi. Ma sono gli unici per cui abbiamo dati dettagliati su scala globale, che ci hanno permesso un'analisi minuziosa anno per anno e paese per paese», precisa Schlenker a «Le Scienze».

Fatte le dovute correzioni per tener conto di conflitti preesistenti e altre spinte alla fuga, Schlenker e Missirian hanno verificato che gli stress climatici incidono sulle migrazioni: nei paesi temperato-caldi, e ancor più in quelli caldi, le partenze aumentano con i rialzi di temperatura. Invece nei paesi più freddi – che però sono una minoranza dei luoghi d'origine – quando il termometro sale le partenze diminuiscono. In generale, le migrazioni sembrano crescere quanto più le temperature medie si scostano da un livello ottimale intorno ai 20°C, probabilmente per gli effetti sulla produzione agricola. Su queste basi i due autori stimano che, sebbene per ora le migrazioni indotte dal clima siano una piccola frazione del totale, entro fine secolo i rifugiati climatici cresceranno fra il 30 e il 190 per cento circa.

Il ruolo del clima nelle crisi sociali è dibattuto da tempo, e anche questa analisi è stata criticata da chi lo trova sopravvalutato rispetto ad altri fattori più rilevanti. «È ovvio che non pretendiamo di pronosticare di preciso che cosa accadrà fra 80 anni», precisa Schlenker. «E il clima non è certo l'unica spinta a migrare, come mostra il fatto che nel 2015 le richieste si siano impennate a 1,5 milioni, non principalmente per ragioni climatiche. Ma i nostri dati mostrano che il clima è un fattore importante. E sono un nuovo segnale d'allarme».

Giovanni Sabato

FISICA

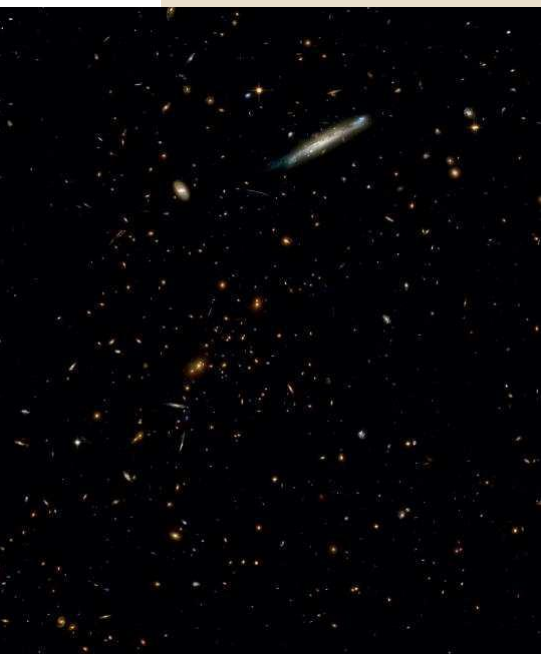
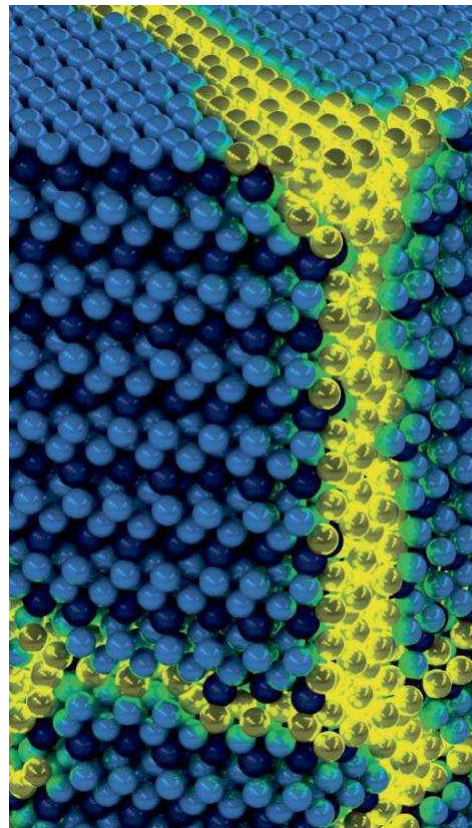
L'eccitonio, finalmente

Osservato un nuovo stato della materia condensata previsto per via teorica cinquant'anni fa

Per studiare la materia condensata, i fisici hanno ideato il concetto di quasiparticella, definito come uno stato di eccitazione collettiva di atomi e molecole che compongono un solido con caratteristiche analoghe a quelle di una particella vera e propria. Una quasiparticella non è quindi una particella reale, ma è comunque dotata di massa, carica elettrica, energia, spin e così via. Grazie a questa ipotesi, diventa possibile studiare le proprietà della materia condensata come se al suo interno si muovessero liberamente queste particelle fittizie debolmente interagenti.

Fra i diversi tipi di quasiparticelle c'è anche l'eccitone, simile all'atomo di idrogeno, ma composto da un elettrone e da una lacuna, ovvero dal vuoto lasciato da un elettrone eccitato in un materiale isolante o semiconduttore (la lacuna ha pertanto carica elettrica positiva). In pratica l'eccitone è uno stato legato elettrone-lacuna, la cui interazione reciproca è guidata dalla forza elettrica. Adesso, come descritto su «Science», un gruppo di fisici guidato da Peter Abbamonte, dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign, ha osservato sperimentalmente un nuovo stato della materia composto da eccitoni, e per questo denominato eccitonio. Previsto per via teorica cinquant'anni fa, l'eccitonio è stato osservato misurando le eccitazioni collettive delle coppie elettrone-lacuna in un materiale portato a 190 kelvin (-83 °C).

Secondo un'altra ricerca effettuata dal gruppo di Tobias Heindel della Technische Universität di Berlino e pubblicata su «APL Photonics», un particolare tipo di eccitone può essere usato anche come qubit, cioè come bit quantistico, alla base del calcolo dei futuri elaboratori quantistici. Si tratta dell'eccitone oscuro, una coppia in cui elettrone e lacuna hanno lo stesso spin e quindi non possono ricombinarsi emettendo direttamente un fotone (da cui il termine oscuro). Hanno pertanto una vita relativamente più lunga degli eccitoni chiari. Le osservazioni di Heindel e colleghi, come quelle del gruppo di Abbamonte, lasciano ben sperare per future applicazioni.

Emiliano Ricci

Energia oscura: vince ancora Einstein

Lo scorso agosto, gli esperimenti LIGO e Virgo hanno rilevato per la prima volta onde gravitazionali prodotte nel processo di fusione tra due stelle di neutroni. L'evento sarà ricordato per aver dato il via alla cosiddetta «astronomia multi-messaggero»: lo stesso fenomeno, infatti, è stato osservato anche nella controparte elettromagnetica da decine di telescopi sparsi in tutto il mondo. Questo risultato rappresenta però anche un severo banco di prova per teorie esotiche che tentano di spiegare l'origine dell'energia oscura, il misterioso «motore» che rende possibile l'espansione accelerata dell'universo.
Jose María Ezquiaga e Miguel Zumalacárregui, dell'Università della California a Berkeley, hanno passato al setaccio queste teorie, pubblicando le loro conclusioni sulle «Physical Review Letters».
Secondo i ricercatori, a uscire ridimensionati sono soprattutto i modelli teorici che propongono modifiche alla teoria di gravità di Albert Einstein, prevedendo che le onde gravitazionali dovrebbero muoversi a una velocità diversa da quella della luce: un'ipotesi, in questo caso, smentita dall'osservazione pressoché simultanea dei segnali gravitazionali e ottici. Al contrario, superano il test le teorie che prevedono un valore costante nello spazio e nel tempo dell'energia oscura, che inciderebbe così allo stesso modo sulla propagazione di onde gravitazionali ed elettromagnetiche, senza modificarne la velocità relativa.
Si tratta di una classe di modelli ispirati a un'idea di Einstein: il fisico tedesco, convinto della staticità dell'universo, introdusse un termine di antigravità (detto costante cosmologica) nelle sue equazioni della relatività generale, per compensare l'attrazione gravitazionale. Fu un errore (l'universo non è statico, si espande) che lui stesso riconobbe, ma di recente è stato rivalutato: identificando la costante cosmologica proprio con l'energia oscura, il modello può giustificare l'espansione accelerata dell'universo.

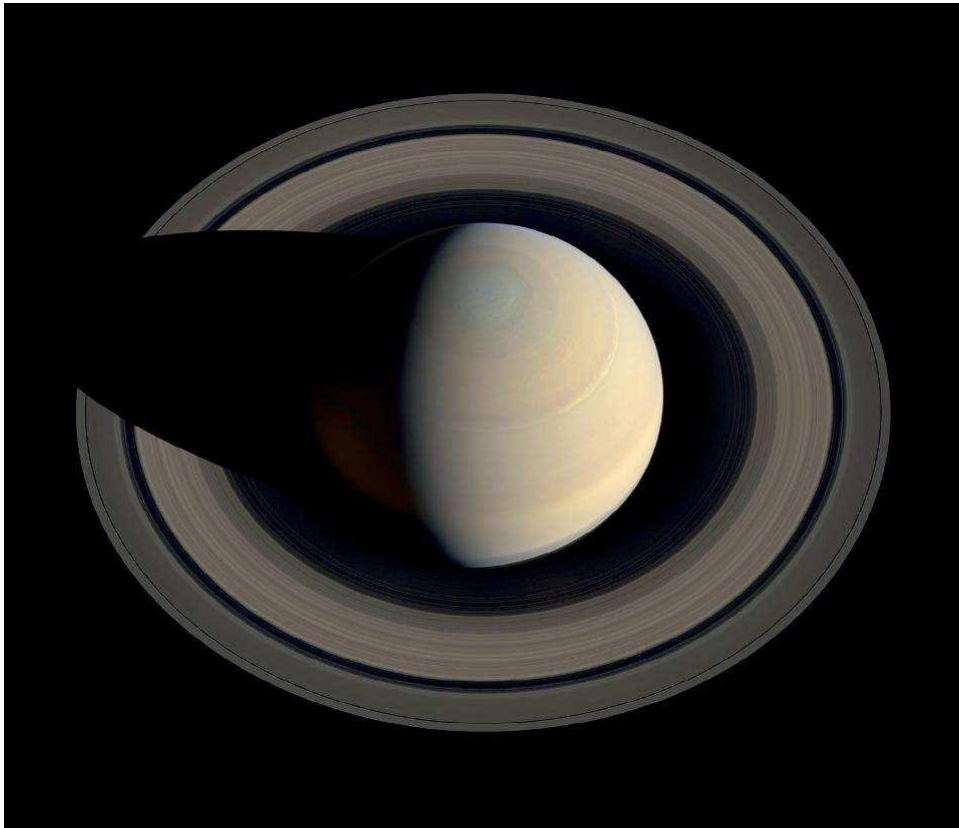
Matteo Serra

Cortesia Peter Abbamonte, Dipartimento di fisica dell'Università dell'Illinois e Frederick Seitz Materials Research Laboratory (*illustrazione eccitoni*); cortesia ESO & ESA/Hubble & NASA (*ammasso di galassie RCS2 J2327*)

ASTRONOMIA

I giovani anelli di Saturno

Queste strutture spettacolari non esistevano ancora quando la Terra era abitata dai dinosauri

Cortesia NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute/G. Ugarkovic

Tra i pianeti del sistema solare è il più riconoscibile, grazie ai suoi caratteristici anelli. Fin da bambini abbiamo imparato a disegnarlo corredandolo di enormi orecchie. Eppure, nella storia di Saturno c'è un passato senza anelli.

La miriade di piccoli oggetti di ghiaccio che orbitano attorno al pianeta, infatti, non è nata insieme a Saturno circa 4,6 miliardi di anni fa, quando si è formato il nostro sistema planetario. Ai tempi dei dinosauri, comparsi circa 230 milioni di anni fa, non esistevano ancora.

L'annuncio è stato dato al recente congresso dell'American Geophysical Union a New Orleans ed è l'ultima sorpresa regalata dalla sonda Cassini, la missione congiunta di NASA, Agenzia spaziale europea e Agenzia spaziale italiana, durante il suo storico tuffo nell'atmosfera di Saturno, il 15 settembre 2017, che ha concluso un'esplorazione da record durata vent'anni.

L'ipotesi di un'origine tardiva degli anelli è basata sullo studio della loro massa, inferiore alle attese secondo le analisi degli ultimi dati di Cassini effettuata dal gruppo guidato da Luciano Iess, del Dipartimento di ingegneria meccanica e aerospaziale della Sapienza Università di Roma. «Se le teorie che legano la massa all'età degli anelli sono corrette – ha spiegato Iess – allora i dati indicano che queste strutture non possono essersi formate insieme a Saturno». Questa ipotesi è confermata anche da un altro dato: se gli anelli fossero stati più antichi, il colore dei milioni di frammenti di cui sono formati – con grandezza variabile dal milionesimo di metro, o micrometro, al metro – avrebbe dovuto essere più scuro a causa del bombardamento di piccoli meteoriti.

Sappiamo molto degli anelli di Saturno. In due decenni di attività, la sonda Cassini li ha attraversati più volte, restituendoci immagini spettacolari. Tuttavia alcuni aspetti sono ancora da chiarire, a partire dal modo in cui si sono formati. Una delle ipotesi più accreditate, confermata da recenti ricerche effettuate dagli scienziati dall'Ames Research Center della NASA, ne attribuisce l'origine all'impatto di una cometa vagante o di un asteroide con una delle lune ghiacciate di Saturno.

Davide Patitucci

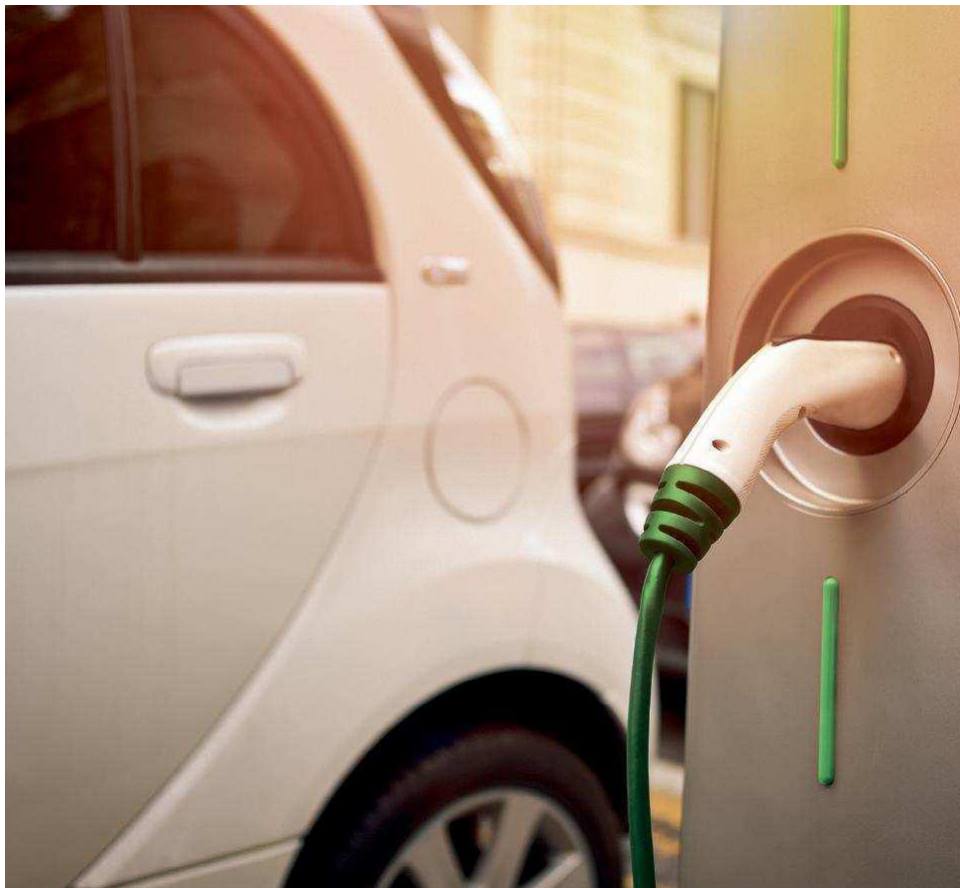
Lo stato vetroso della luce

La luce, quando si propaga, può presentare proprietà tipiche del vetro. Lo dimostra uno studio pubblicato su «Nature Communications» da un gruppo di ricerca della Sapienza Università di Roma, del Consiglio nazionale delle ricerche e dell'Università di Gerusalemme, guidato da Davide Pierangeli.
La scoperta prende spunto da un fenomeno teorizzato negli anni ottanta dal fisico italiano Giorgio Parisi, detto «rottura di simmetria delle repliche», secondo cui copie identiche dello stesso sistema complesso (o disordinato) possono comportarsi in modi differenti. Questa proprietà, che rappresenta un criterio per stabilire il livello di complessità di un sistema, è detta anche «fase vetrosa» di un sistema complesso, in quanto tipica del vetro. Pierangeli e colleghi sono riusciti a dimostrare sperimentalmente che questo fenomeno riguarda anche la luce: studiando la propagazione di fasci laser in una pellicola sottilissima di un materiale disordinato, i ricercatori hanno osservato che nelle stesse condizioni sperimentali il sistema può evidenziare proprietà diverse.
La scoperta conferma la «complessità» con cui le onde elettromagnetiche viaggiano in certi materiali, e rappresenta un'importante verifica dell'universalità, nell'ambito dei sistemi complessi, del fenomeno previsto da Parisi.

Matteo Serra

CLIMA

Comportamento modello

Analizzato l'impatto dei comportamenti individuali nei modelli del cambiamento climatico

Nonostante sia l'artefice dell'aumento della temperatura media globale, il genere umano potrebbe essere il fattore cruciale della sua riduzione. A sostenerlo sono Brian Beckage, professore di modellistica all'Università del Vermont, e colleghi, che su «Nature Climate Change» dimostrano l'importanza del comportamento umano nei modelli previsionali sul cambiamento climatico.

A causa della complessità dei processi fisici che riguardano il clima, i modelli sono affetti da un'inevitabile incertezza. Altrettanto significative sono però le incognite sociali, frequentemente trascurate nonostante i consumi individuali siano responsabili di quasi un terzo delle emissioni dei paesi industrializzati. «I modelli climatici possono facilmente elaborare previsioni e formulare ipotesi sulla riduzione delle emissioni, ma lo fanno senza avere basi razionali sulle risposte che innescano nelle società», sostiene Louis Gross, professore di ecologia e biologia evoluzionistica all'Università del Tennessee.

Coniugando psicologia sociale e climatologia, i ricercatori hanno esaminato come i cambiamenti nel comportamento si evolvano in risposta a eventi climatici estremi e a loro volta influenzino il cambiamento climatico. Questo meccanismo retroattivo prevede entro fine secolo un aumento di temperatura compreso tra 3,4 e 6,2° C rispetto ai 4,9 ° C di un modello climatico puro. Secondo gli autori, i cambiamenti difficilmente reversibili, come l'isolamento delle abitazioni o l'acquisto di auto ibride, hanno un impatto assai più grande nel mitigare le emissioni di gas serra rispetto ad aggiustamenti a breve termine, come abbassare i termostati o usare più spesso i mezzi pubblici.

«Una migliore comprensione della percezione umana sul cambiamento climatico nonché le risposte comportamentali sono fondamentali per frenare le emissioni», conclude Beckage, riconoscendo il ruolo cruciale di programmi e politiche governative nel favorire cambiamenti di comportamento a lungo termine.

Davide Michielin

Sete da anidride carbonica

Il riscaldamento globale ha una grande influenza sulla crescita delle piante agricole. In particolare, l'aumento di temperatura fa aumentare l'evapotraspirazione, cioè le piante perdono acqua dalle foglie in maniera maggiore, quindi hanno bisogno di più acqua dal terreno. Un po' come noi che, quando sudiamo, dobbiamo bere di più. Allo stesso tempo l'aumento di CO_2 in atmosfera tende a far crescere di più le piante. Dunque, bisogna valutare tutte queste componenti per una visione realistica della questione. Daniel Urban, della Stanford University, e collaboratori hanno analizzato il problema, considerando anche il fatto che la CO_2 ha un ruolo sul processo di evapotraspirazione e dunque sulla domanda d'acqua delle piante stesse. In un articolo pubblicato su «Nature Climate Change», i ricercatori hanno considerato l'influenza della CO_2 sulla evapotraspirazione di mais, soia, grano e riso durante il periodo 1948-2013. Con questa stima più accurata, hanno scoperto un generale aumento della domanda d'acqua di queste piante agricole soprattutto dagli anni ottanta in poi, più grande di quanto si pensasse in precedenza soprattutto per il grano. Quest'ultimo, probabilmente, richiederà in futuro quantità di acqua che potremmo far fatica a fornire.

Antonello Pasini

omada/iStock

BIOLOGIA

L'immunità che aiuta a crescere

Alcune cellule immunitarie sostengono lo sviluppo del feto nei primi tre mesi di gravidanza

La doppia natura delle cellule *natural killers* (anche dette linfociti NK) è stata svelata da uno studio pubblicato su «Immunology». Queste cellule immunitarie, spietate quando si tratta di combattere tumori e infezioni virali, hanno anche un «lato gentile»: sostengono lo sviluppo del feto nel primo trimestre di gravidanza grazie alla sintesi di specifici fattori di crescita.

I ricercatori, coordinati da Haiming Wei dell'Università della scienza e la tecnologia della Cina, sapevano che nelle fasi iniziali di una gravidanza la superficie interna dell'utero materno è ricca di linfociti NK, che diminuiscono drasticamente intorno ai quattro mesi di gestazione, a placenta ormai formata. Tracciando il profilo molecolare di quei linfociti, gli autori hanno scoperto che la maggior parte aveva recettori superficiali diversi da quelli presenti nelle popolazioni di linfociti NK residenti in altri tessuti.

In effetti, quelli uterini sono linfociti NK particolari, la cui interazione con le cellule della placenta in formazione innesca la sintesi di due fattori di crescita: la proteina pleiotropina, che nel feto controlla lo sviluppo di vasi sanguigni, osso, cartilagine e fibre nervose, e l'osteoglicina che interviene nella formazione di cuore, pelle e occhi. A riprova dell'importanza dei linfociti NK uterini per l'iniziale sviluppo del feto, i ricercatori hanno osservato che nelle donne con aborti frequenti il numero di queste cellule a inizio gravidanza è metà del normale. Da qui l'idea di sviluppare una terapia basata sulla somministrazione di dosi extra di linfociti NK uterini durante i primi mesi di gestazione.

Nei topi la tecnica ha funzionato. Dopo aver bloccato la produzione di linfociti NK uterini in femmine di topo incinta (col risultato che i feti crescevano la metà e presentavano anomalie nello sviluppo scheletrico), i ricercatori ne hanno ripristinato le giuste quantità riuscendo a «correggere» il decorso della gravidanza.

Martina Saporiti

L'enigmatica storia evolutiva del sistema nervoso

Il sistema nervoso centrale degli animali a simmetria bilaterale – vale a dire la maggior parte degli animali comunemente noti, inclusi i vertebrati, gli artropodi e gli anellidi – non discende dal loro progenitore comune, ma si è evoluto indipendentemente nei vari gruppi. Lo afferma su «Nature» Andreas Hejnol, dell'Università di Bergen, in Norvegia.

I sistemi nervosi di vertebrati, insetti e anellidi hanno una struttura simile, con un cervello e una corda nervosa lungo il corpo. Perciò, fin dall'Ottocento, ne era stata ipotizzata un'origine comune, corroborata di recente dagli studi genetici, che hanno mostrato come i geni che ne dirigono lo sviluppo siano gli stessi nei vertebrati, nella drosofila e in un anellide, *Platynereis dumerilii*.

Nel 2006 si è poi scoperto che l'espressione di questi geni è invece molto diversa in un verme del phylum degli emicordati, affine ai vertebrati ma la cosa è stata considerata un'eccezione, una modifica intervenuta in seguito sul piano di sviluppo originario.

Per controllare se le cose stavano davvero così, Hejnol ha esplorato vari ambienti per raccogliere ed esaminare diverse specie di vari gruppi tassonomici. Ha così osservato che in parecchie specie l'espressione genica nello sviluppo del sistema nervoso è molto diversa da quella di vertebrati e insetti. E questo non accade non soltanto in animali insoliti come gli Xenacoelomorpha – un phylum di vermi marini che si sono separati anticamente dagli altri bilateri e che sono dotati di sistemi nervosi molto variegati – ma anche in vari gruppi di bilateri tipici, incluso persino un anellide affine a *Platynereis dumerilii*.

Diventa quindi difficile sostenere che sistemi nervosi che si sviluppano in modi così diversi discendano da uno stesso progenitore, ma non tutti sono pronti a scartare l'origine comune, anche perché non è chiaro come sostituirla.

Le affinità fra vertebrati, insetti e alcuni anellidi restano, ed è difficile spiegarle come un'evoluzione convergente avvenuta più volte indipendentemente. Perciò le interpretazioni restano caute, e c'è chi ipotizza una ramificazione di percorsi evolutivi partita da una base comune, con modifiche successive che hanno portato alle situazioni più bizzarre.

Giovanni Sabato

angelhell/iStock

CONSERVAZIONE AMBIENTALE

Gli invasori più dannosi d'Europa

Pubblicata la prima lista delle specie aliene in Europa classificate in base alla loro dannosità

Betty4240/iStock

I tentativi di stilare una graduatoria sulla dannosità delle specie esotiche per aumentare la consapevolezza dei rischi delle invasioni biologiche, hanno due grandi limiti. Innanzitutto, sono basati sull'opinione di esperti, che per quanto autorevoli, forniscono giudizi inevitabilmente soggettivi. Inoltre, mirano a descrivere la diversità tassonomica e dell'habitat piuttosto che a quantificare il danno causato dalle specie invasive.

Ricorrendo a un approccio alternativo, Wolfgang Nentwig, professore di ecologia delle comunità all'Università di Berna, in Svizzera, e colleghi, hanno pubblicato su «Biological Invasions» una lista che ordina con maggiore rigore le specie ad alto impatto ambientale e socioeconomico.

I ricercatori hanno adottato il protocollo previsto dal sistema di punteggio di impatto generico (GISS) per classificare 486 specie esotiche presenti in Europa. In particolare, si sono concentrati su specie native di altri continenti, escludendo sia quelle provenienti da regioni europee sia i parassiti e gli agenti patogeni, di cui è difficile identificare l'origine.

Il GISS prevede 12 categorie di impatto su una scala da 0 (nessun impatto) a 5 (massimo impatto). Parallelamente alla graduatoria basata sulla somma totale, le specie sono state ordinate anche sulla base della frequenza dei punteggi di livello 5, il cui impatto è considerato irreversibile. La combinazione dei due metodi ha partorito una lista che comprende le 149 specie più invasive del continente. Il 64 per cento di questi invasori dannosi si concentra negli ambienti terrestri, il 26 per cento in fiumi e laghi e solo il 10 per cento negli habitat marini.

Com'era prevedibile, ratto, gambero americano, varroa, topo muschiato e acacia occupano le prime posizioni dell'elenco, ma il primato spetta a un ospite per certi versi inaspettato: l'oca canadese, vorace e aggressivo flagello dell'Europa settentrionale.

Davide Michielin

L'adattabilità delle piante aliene

Le piante invasive sono più adattabili del previsto e non è facile pronosticare come si comporteranno. L'idea prevalente era che, quando una specie approda in un nuovo territorio, il più delle volte conservi le preferenze native, occupando ambienti dal clima simile a quello d'origine. Alcuni piccoli studi sembravano corroborare questa tesi, ma Daniel Atwater, del Virginia Tech di Blacksburg, mostra su «Nature Ecology and Evolution» che non è così. Analizzando i dati su oltre 800 piante invasive insediatesi nei cinque continenti, Atwater ha constatato che hanno modificato tutte le loro preferenze ecologiche, talvolta poco ma spesso in modo sostanziale, adattandosi ai climi disponibili nel nuovo territorio, e costituendo popolazioni stabili o in crescita in una gamma di ambienti molto più varia del previsto. Le più adattabili sono le piante coltivate e quelle con una lunga vita.
«Questo complica non solo le previsioni sulla diffusione delle specie invasive, ma anche il contenimento. Se per esempio si ricorre al controllo biologico con insetti, non è detto che questi riusciranno a seguirle nei nuovi ambienti», rimarca Atwater. «Ora vogliamo indagare se si possa prevedere in che modo le piante cambiano preferenze, così da poterne valutare meglio i rischi in anticipo».

Giovanni Sabato

Quanto durerà il terremoto?

Perché in certi terremoti le scosse tormentano le popolazioni per anni, mentre in altri si esauriscono più rapidamente? Rispondono su «Scientific Reports» ricercatori di Consiglio nazionale delle ricerche, Istituto nazionale di geofisica e vulcanologia (INGV), e «Sapienza» Università di Roma diretti da Carlo Doglioni dell'INGV, che hanno analizzato le sequenze innescate da 10 terremoti di magnitudo fra 5.9 e 8.8 in Algeria, Italia, Grecia, Turchia, Nepal e Cina. È risultato che i sismi espansivi, innescati da faglie con i bordi che si allontanano, mostrano sequenze di 900-1200 giorni, mentre quelli compressivi, dove i bordi spingono uno contro l'altro, hanno sequenze che si esauriscono anche solo dopo 600 giorni.

«Nei terremoti compressivi lo spostamento della crosta terrestre avviene contro la forza di gravità, dissipando più energia e lasciandone meno per il prosieguo della sequenza sismica», dice Doglioni. «Dove la faglia si dilata, la crosta si muove in favore di gravità, innescando lunghe sequenze, che terminano con un nuovo equilibrio gravitazionale».

Il risultato è che i terremoti compressivi sono in media più intensi, ma innescano più spesso sequenze brevi. In Italia i sismi sono quasi tutti espansivi, seguiti da repliche «infinite». (AlSa)

Interferometri atomici per la relatività generale

Per studiare gli effetti della relatività generale è possibile usare anche interferometri atomici, che possono essere ospitati nella stanza di un laboratorio. Lo dimostrano due nuovi esperimenti guidati da Guglielmo Tino, dell'Università di Firenze e associato dell'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), entrambi descritti sulle «Physical Review Letters».

Il primo esperimento, effettuato nell'ambito del progetto MAGIA Advanced (Misura Accurata di G – la costante gravitazionale – mediante Interferometria Atomica), ha impiegato una «fontana atomica» di atomi di rubidio raffreddati sottovuoto con un laser fin quasi allo zero assoluto. Gli atomi sono lanciati verso l'alto e poi osservati in caduta libera. Il sistema messo a punto elimina gli effetti del gradiente gravitazionale terrestre, permettendo così di svolgere test assai precisi sulla validità del principio di equivalenza di Einstein. Il secondo esperimento ha impiegato fontane atomiche di stronzio per valutare la fattibilità di osservazioni su scala quantistica del passaggio di onde gravitazionali a bassissima frequenza (non osservabili con gli attuali strumenti ottici) tramite interferometri atomici. Le prove hanno dato esito positivo, aprendo la strada all'uso di strumenti di dimensioni e costi minori rispetto agli interferometri ottici. (EmRi)

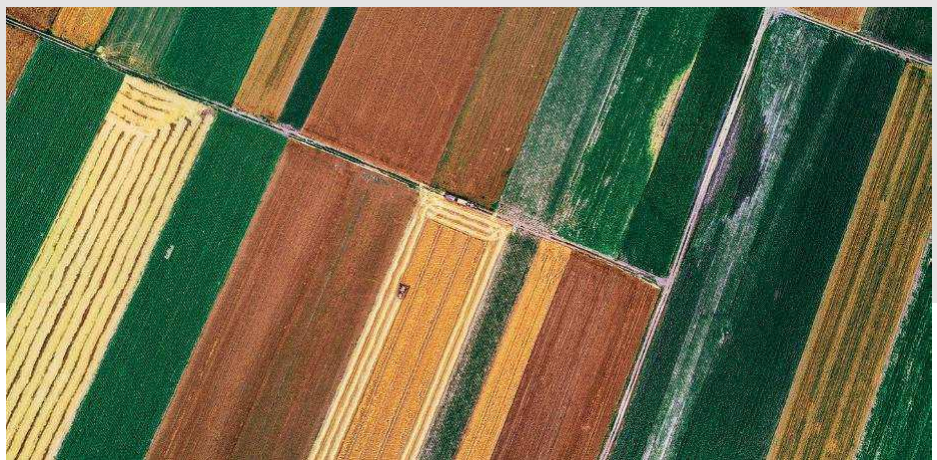
Il robot diventa social

Mortimer è un robot batterista presentato nel 2014 dalla Queen Mary University di Londra. Ora i suoi ideatori lo hanno coinvolto in sessioni musicali con musicisti umani, dandogli la facoltà di postare su Facebook. Lo scopo dello studio, pubblicato su «IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems», era verificare se i *social media* agiscono sul rapporto uomo-robot.

Si è visto che i post pubblicati dai musicisti in compagnia di Mortimer hanno avuto grande seguito, «spinto» dalla presenza del robot, mentre i post dell'automa hanno avuto pochi *like* forse perché, secondo Louis McCallum, della Scuola di ingegneria elettronica e informatica della Queen Mary, «il dilagare di *fake news* genera diffidenza verso contenuti creati automaticamente». Altro aspetto emerso è che gli amici di Facebook di Mortimer hanno diminuito nel tempo la durata delle sessioni con il robot, al contrario di quelli privi di contatto social: il rapporto virtuale sostituirebbe in parte quella reale. (RiOl)

L'alba di una seconda rivoluzione verde?

La necessità aguzza l'ingegno: per informazioni, chiedere a Thomas Robert Malthus oppure a Paul Ehrlich, le cui previsioni catastrofiche sull'insostenibile crescita demografica furono sconfessate da significativi progressi in campo agronomico. Una nuova rivoluzione verde potrebbe essere alle porte: i ricercatori di alcuni istituti di ricerca australiani e britannici, coordinati dall'Università del Queensland, hanno annunciato su «Nature Plants» lo sviluppo di una tecnica capace di ridurre l'intervallo tra semina e raccolto ad appena otto settimane, e quindi di ottenere sei raccolti di grano duro all'anno invece dei due ora possibili su scala commerciale. Gli stessi risultati sono stati ottenuti su frumento, orzo, piselli e ceci. La tecnica prevede ambienti di crescita controllati e luci a LED ottimizzate per alimentare la fotosintesi in regimi intensivi fino a 22 ore al giorno. A detta dei ricercatori, l'aspetto delle piante è uguale a quelle cresciute in condizioni standard, come lo è quello dei loro semi.

«Da anni il miglioramento genetico delle colture di base si è fermato. Aumentare il numero annuale di generazioni permetterà di isolare più rapidamente combinazioni ad alta resa e di individuare le varietà più adatte per ambienti diversi», ha commentato Brande Wulff, del John Innes Centre di Norwich, in Regno Unito. (DaMi)

iStock (*terremoto*); iLexx/iStock (*robot*); Drazen/iStock (*campi*)

Costruire con il DNA

Quattro distinti gruppi di ricerca hanno annunciato su «Nature» nuove tecniche per aumentare le dimensioni e la produzione di oggetti microscopici a partire da filamenti di DNA.

Vari tipi di polimeri biologici (DNA, RNA e proteine) sono da tempo usati per progettare sistemi nanotecnologici in grado di comunicare tra loro e di regolare le funzioni degli organismi viventi. Tra questi, il DNA ha una serie di vantaggi: è programmabile, stabile e compatibile con altre molecole biologiche. Queste caratteristiche dovrebbero consentire la costruzione di «etero-biomateriali» con funzioni complesse. Finora però era stato possibile costruire solo oggetti di DNA molto piccoli. Le nuove tecniche di assemblaggio hanno portato a oggetti fino a 20 volte più grandi, che potrebbero essere usati per produrre componenti di dispositivi elettronici o sistemi di rilascio di farmaci, e di aumentare le quantità di questi oggetti che possono essere prodotte in laboratorio. **(EnPr)**

Un nuovo candidato per la materia oscura

La materia oscura ha un nuovo candidato: le SIMP, ovvero *strongly interacting massive particles*. A proporre questa soluzione è Hitoshi Murayama, dell'Università della California a Berkeley, che, assieme a Yonit Hochberg, della Hebrew University, in Israele, le aveva già ipotizzate nel 2014. Le SIMP somigliano molto ai mesoni: sarebbero formate da un quark e un antiquark (naturalmente non dello stesso tipo) legati da un gluone. Ecco, la differenza sta proprio nel gluone, che per le SIMP sarebbe di un tipo nuovo e sconosciuto.

Secondo Murayama, le SIMP interagiscono fortemente (*strongly*) solo fra di loro, ma debolmente con la materia ordinaria. Grazie a questa proprietà, spiegherebbero alcune osservazioni. In particolare, essendo più piccole e meno massicce delle WIMP, le SIMP sarebbero più numerose e diffuse, e le loro reciproche interazioni renderebbero più lungo e complesso il processo di accumulo. Tracce di questo fenomeno sarebbero visibili nella collisione fra quattro galassie all'interno dell'ammasso Abell 3827, dove la materia ordinaria è molto più concentrata della materia oscura, ma soprattutto nelle galassie nane, dove la materia oscura, invece che concentrarsi vero il nucleo, ha una distribuzione molto più piatta e diffusa. **(EmRi)**

Liberarsi dal carbone si può

Per arginare il cambiamento climatico si dovrà abbandonare il carbone, il combustibile che emette più CO_2 per unità di energia prodotta. Un rapporto recente pubblicato dall'International Energy Agency (IEA) fornisce qualche speranza a questo obiettivo. Nel 2016 a livello globale l'uso di carbone è sceso a 5,357 miliardi di tonnellate, cioè - meno 4,2 per cento sul 2014, grazie alla sua sostituzione con metano, solare ed eolico, e alla maggiore efficienza delle nuove centrali. Tra il 2015 e il 2016, in Cina il suo consumo

è passato da 3,8 a 3,5 miliardi di tonnellate, negli Stati Uniti da 800 a 730 milioni di tonnellate, e nell'Unione Europea da 262 a 239 milioni di tonnellate. Queste diminuzioni, però, in parte sono state compensate dall'aumento dell'uso del carbone nel resto dell'Asia, in particolare in India, dove nel 2016 il consumo è aumentato del quattro per cento sul 2015. Ma l'anno scorso il prezzo del carbone è quasi raddoppiato, rendendolo meno competitivo, vari paesi, fra cui l'Italia, ne hanno annunciato l'abbandono entro dieci anni, altri hanno introdotto tasse sulla CO_2 emessa. L'IEA ritiene quindi che il trend dovrebbe continuare: entro il 2022 la quota del carbone sui consumi globali di energia dovrebbe passare dal 26 al 25 per cento. **(AlSa)**

Peggiora la qualità dell'aria in Italia

In Italia la grande siccità del 2017 ha peggiorato anche l'inquinamento atmosferico. Lo rivela un rapporto recente sulla qualità dell'ambiente urbano dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA), che ha raccolto i dati per il 2016 delle 119 maggiori città italiane.

Nel 2017 sono stati superati i limiti massimi di ozono in 84 di questi centri, contro i 38 del 2016, inoltre il valore massimo giornaliero di PM10 è stato superato in 34 città, una in più che nel 2016. Infine, se nel 2016 il record di sforamenti di PM10 era di Frosinone, con 85 volte, nel 2017 l'emergenza si è acuita e concentrata in Italia settentrionale, con Torino che ha superato quel limite ben 103 volte.

Clima a parte, nel rapporto si trovano altre ragioni per la cattiva qualità dell'aria nelle nostre città.

Il parco automobili, per esempio, è cresciuto dello 0,7 per cento fra il 2015 e il 2016, con il record di L'Aquila, 718 auto ogni 1000 abitanti, anche se in termini assoluti domina Roma, con 1,585 milioni di auto, tre volte quelle di Milano. A peggiorare le cose, dei 37 milioni di auto circolanti in Italia, 9,5 milioni sono ancora Euro 0, 1 o 2, con il record di Napoli, dove il 28,3 per cento dei veicoli è altamente inquinante. Infine, in 96 delle 119 città considerate il verde pubblico copre meno del cinque per cento dell'area, con estremi come Lecce, Viterbo o Trapani, dove meno dello 0,3 per cento del suolo è parco o giardino. **(AlSa)**

DeoSum/iStock (*DNA*); Francesco Cantone/iStock (*traffico*); iStock (*inquinamento*)

GENETICA

Lotta alla malaria con il gene drive

Una tecnica innovativa di ingegneria genetica punta a eliminare la trasmissione della malaria colpendo e affondando i vettori di questa malattia, le zanzare di un gruppo ben preciso

di Andrea Crisanti e Roberto Galizi

Malaria o «mal aere», come il veneziano Marco Cornaro nel XV secolo usava appellarsi all'aria cattiva della laguna di Venezia e delle sue zone palustri causa di «molta febre»; almeno, questa si pensava fosse l'origine della malattia che falcidiava vite sin dai tempi dei tempi. Niente di più vero, paludi come quella che un tempo era la laguna veneziana sono l'habitat perfetto per la riproduzione dell'animale più pericoloso per l'essere umano: la zanzara.

Volker Steger/Science Photo Library/AGF

Questi insetti sono responsabili della trasmissione di numerose malattie debilitanti e spesso mortali, tra cui la malaria, causata da un parassita chiamato plasmodio. In tutto il globo, a eccezione dell'Antartide, si contano più di 3000 specie di zanzare, ma solo alcune sono in grado di trasmettere malattie all'essere umano e rappresentano dunque il vero pericolo; sono principalmente quelle appartenti ai generi *Aedes*, *Anopheles* e *Culex*, vettori di malattie come dengue, Zika, febbre gialla, encefalite e appunto malaria. In particolare, il parassita che causa la malaria è trasmesso all'essere umano esclusivamente da un gruppo limitato di zanzare del genere *Anopheles* che ogni anno è responsabile di circa 445.000 casi mortali di questa malattia, di cui oltre il 90 per cento in Africa. Spesso sono piccole vittime. Secondo il *World Malaria Report 2017*, infatti, ogni due minuti un bambino al di sotto dei cinque anni muore di malaria.

L'adozione di sistemi di controllo – riduzione delle aree di riproduzione del vettore (la zanzara), farmaci, vaccini, zanzariere e insetticidi – ha determinato una progressiva diminuzione dei casi di malaria, ma gli ostacoli da affrontare per sconfiggere la malattia sono ancora molti. Alcuni motivi del rallentamento verso questo obiettivo sono l'elevata capacità del parassita di evadere il sistema immunitario umano, che permette quindi la diffusione dell'infezione, lo sviluppo di resistenza agli insetticidi nelle zanzare e le difficoltà logistiche per la distribuzione delle misure di controllo. Ecco perché l'Organizzazione mondiale della Sanità ribadisce la necessità di un'azione immediata che possa combinare misure già disponibili con nuove tecnologie di controllo.

Le armi della biologia

Sono passati due secoli da quando il biologo e monaco moravo Gregor Mendel dimostrò l'ereditarietà dei caratteri genetici da una generazione all'altra. Mendel confermò inoltre che i due genitori contribuiscono in modo paritario al patrimonio genetico della progenie. Quindi, per ciascun gene la prole eredita una copia dalla madre e una dal padre; queste copie alternative, materna e paterna, di uno stesso gene sono chiamate alleli. Gli alleli ereditati possono essere diversi tra loro, quindi nella cosiddetta «eterozigosi», oppure uguali, nel qual caso si dice «in omozigosi».

Un centinaio di anni dopo il medico e zoologo italiano Giovanni Battista Grassi e il chirurgo britannico Ronald Ross identificarono il primo parassita malarico nello stomaco di una zanzara del genere *Anopheles*: *Plasmodium falciparum*, la specie di plasmodio malarico più pericolosa per l'essere umano, trasmesso da persona a persona attraverso una semplice puntura di femmine di zanzara appartenenti a una manciata di specie del genere *Anopheles*.

Al contrario dei maschi, infatti, le femmine hanno bisogno del sangue per il nutrimento e per fattori necessari alla produzione delle uova da cui poi si schiuderà una numerosa progenie.

La scoperta ha incentivato più di un secolo di ricerche sulla biologia della zanzara, sulla loro biodiversità ed ecologia. La conoscenza del vettore ha determinato progressi importanti verso il controllo della malaria, arrivando addirittura alla sua eliminazione in numerose regioni. L'eliminazione locale della malaria è stata raggiunta nelle zone in cui una concomitanza di fattori favorevoli ha permesso di bloccarne la trasmissione; tra questi fattori citiamo un basso numero di persone infette e una bassa densità di serbatoi di zanzare in prossimità di centri abitati. In alcune regioni dell'Africa subsahariana, dove il parassita della malaria viene trasmesso a 200 milioni di persone ogni anno, le zanzare infette possono pungere una persona anche diverse volte al giorno durante la stagione ad alta trasmissione, uno dei principali motivi per cui l'Africa soffre la maggior parte dell'onere della malaria.

Spazio alla genetica

Una quindicina di anni fa circa il nostro gruppo di ricerca all'Imperial College di Londra è riuscito a generare la prima zanzara *Anopheles* geneticamente modificata, come abbiamo illustrato su «Nature». Due anni dopo è stata ottenuta la sequenza dell'intero genoma e quindi del corredo genico di alcune specie di zanzare, tra cui *Anopheles gambiae*, inaugurando un nuovo affascinante capitolo nella lotta contro la malaria. La conoscenza del genoma ha facilitato l'identificazione di fattori genetici fondamentali, come quelli coinvolti nella fertilità dell'insetto o nella suscettibilità alla trasmissione del parassita, rendendo possibili modifiche genetiche grazie a cui ridurre la capacità di riproduzione o quella di infezione.

La conoscenza del genoma della zanzara che trasmette la malaria ha inaugurato un nuovo capitolo nella lotta alla malattia

Numerosi modelli indicano che queste modifiche dovrebbero raggiungere una frequenza del 90 per cento nella popolazione di zanzare per poter avere effetto sulla trasmissione della malaria. Il problema è che la frequenza di qualsiasi modifica genica non aumenta spontaneamente; nella migliore delle ipotesi rimane costante, e quindi uguale a quella raggiunta al momento del rilascio degli insetti geneticamente modificati nell'ambiente. La ragione è che le zanzare, come tutti gli organismi che si riproducono per via sessuale, ereditano due corredi di cromosomi e quindi di geni: uno dal padre e uno dalla madre.

Nel processo chiamato meiosi, che porta alla formazione dei gameti (ovuli e spermatozoi, *si veda il box nella pagina a fronte*), la probabilità che una delle due versioni del gene sia ereditata è del 50 per cento. Affinché la modifica genetica raggiunga la soglia del 90 per cento si dovrebbe liberare un numero gigantesco di zanzare, dieci volte quello della popolazione da attaccare; è un approccio di difficile realizzazione per ovvie implicazioni, tra cui costi e logistica. I meccanismi che regolano l'ereditarietà sono quindi un ostacolo formidabile per la diffusione di modifiche genetiche da poche decine di individui ingegnerizzati in laboratorio a intere popolazioni sparse in aree vastissime dell'Africa.

In natura però ci sono esempi di geni che possono diffondersi progressivamente a una popolazione di insetti partendo da pochi individui, e i meccanismi molecolari che li controllano prendono il nome di *gene drive*. Numerosi studi teorici ipotizzano l'uso di questi meccanismi in misure di controllo contro la malaria. Potenzialmente il gene drive può diffondere nelle popolazioni di zanzare alcune modifiche genetiche che riducono la capacità di trasmissione della malattia, riducendo il numero di questi insetti o rendendoli resistenti al parassita.

Il primo modello di gene drive studiato a fondo dal punto di vista biologico e molecolare è stato il cosiddetto «trasposone P» del moscerino della frutta, vale a dire un elemento genetico capace di spostarsi (traslocare) da una posizione all'altra del genoma dell'insetto. Questo trasposone ha una struttura semplice: è costituito da una sequenza di DNA che codifica per un enzima (chiamato trasposasi) e da due sequenze di DNA che si trovano ai due estremi del DNA codificante. L'enzima riconosce le sequenze ai due estremi, induce la mobilizzazione del trasposone e ne facilita l'inserzione in un'altra regione del DNA (o del genoma). Questo processo è attivato in modo selettivo durante la formazione dei gameti e determina un aumento delle copie del trasposone e la loro diffusione su diversi cromosomi; in questo modo aumenta la probabilità che una copia dello stesso trasposone sia trasmessa a tutti gli individui della progenie. In seguito sono stati identificati numerosi elementi genetici con caratteristiche simili al trasposone P del moscerino della frutta.

Anche i batteri del genere *Wolbachia* hanno la capacità di diffondersi in una popolazione di insetti comportandosi come un elemento genetico invasivo assimilabile al gene drive. Questi batteri si trasmettono da un individuo all'altro principalmente attraverso le uova, facendo in modo che tutta la progenie di una femmina infetta erediti l'infezione. Le uova depositate dalle femmine infette producono sempre una progenie vitale, non importa se gli spermatozoi che le hanno fertilizzate fossero di maschi infetti o meno. Viceversa, le uova di femmine non infette non producono una progenie vitale se fertilizzate da spermatozoi di maschi infetti. Così, le femmine non infette hanno una capacità riproduttiva ridotta e sono via via eliminate.

In teoria i trasposoni e *Wolbachia* potrebbero essere usati per diffondere geni che alterino la capacità riproduttiva di popolazioni di zanzare o che rendano le zanzare incapaci di trasmettere il parassita della malaria. Tuttavia, né i trasposoni né *Wolbachia* hanno trovato applicazioni pratiche per il controllo della malaria con gene drive. Le zanzare del genere *Anopheles* sono poco suscettibili all'azione copia-incolla dei trasposoni più studiati e sono per la maggior parte immuni all'infezione da *Wolbachia*.

In natura però ci sono altri esempi di elementi genetici che agiscono come gene drive: sono chiamati *homing endonuclease ge-*

Andrea Crisanti è professore di parassitologia molecolare all'Imperial College di Londra ed *editor-in-chief* della rivista «Pathogens and Global Health». Il suo laboratorio è oggi tra i centri più avanzati a livello mondiale per la ricerca e lo sviluppo di nuovi sistemi per il controllo della malaria.

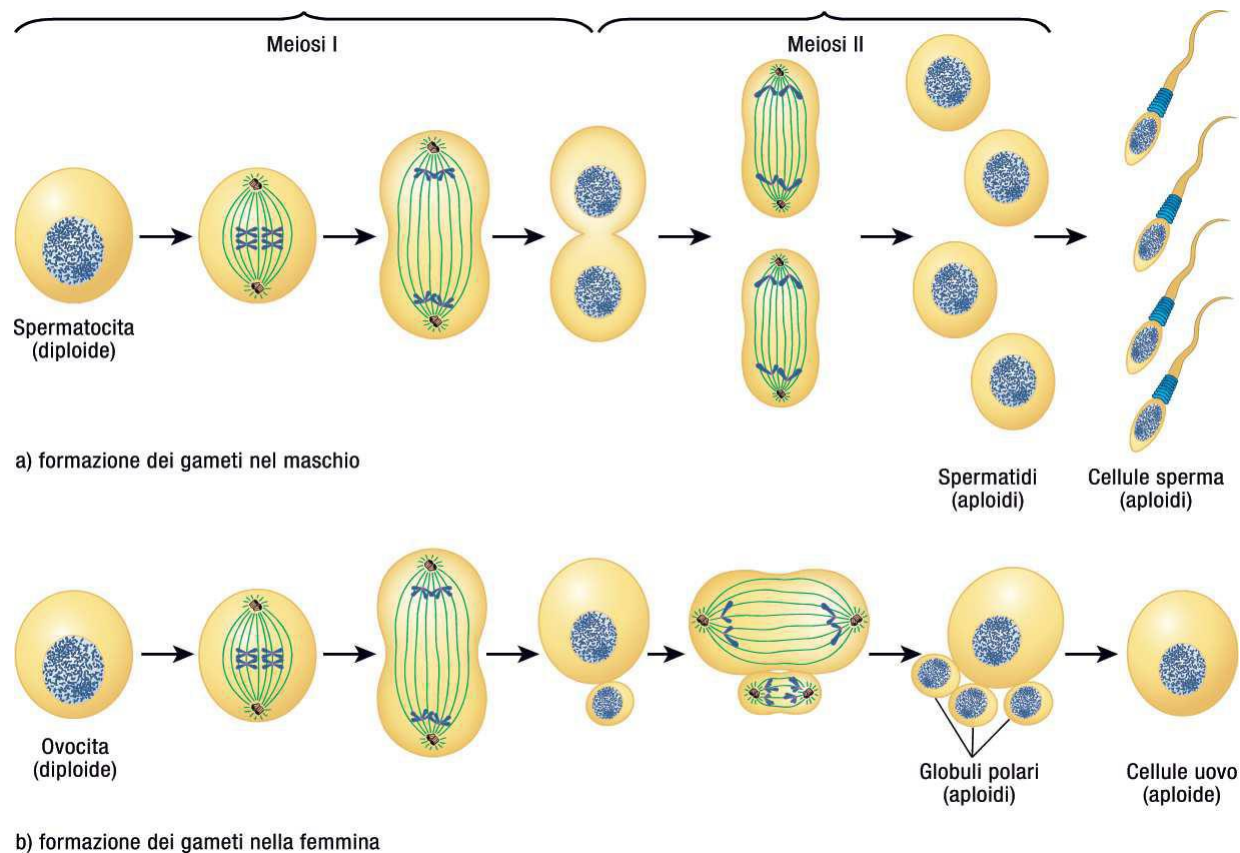
Roberto Galizi è ricercatore associato presso l'Imperial College di Londra, impegnato nello sviluppo di nuove tecnologie per il controllo dei vettori responsabili della trasmissione di malattie umane.

Uno dal padre e uno dalla madre

Nella zanzara, come in altri organismi a riproduzione sessuata come l'essere umano, le cellule germinali, precursori dei gameti maschili e femminili, subiscono due divisioni meiotiche in successione prima di giungere alla maturazione completa. Durante la meiosi il corredo diploide (cioè due copie per ogni cromosoma in ogni cellula) è dimezzato per renderlo aploide (una sola copia di ogni cromosoma) con la formazione dei gameti.

Nel maschio avviene la spermatogenesi (*a*); il processo inizia dallo spermatogonio (cellula contenente due copie di ciascun cromosoma più i cromosomi sessuali X e Y) e termina con la produzione degli spermatozoi (gameti maschili, con una copia di ciascun cromosoma più uno dei due cromosomi sessuali X o Y). Nella femmina avviene l'ovogenesi (*b*); inizia dall'ovogonio (con due copie di ciascun cromosoma più due copie del cromosoma sessuale X) e termina con la produzione degli ovuli (gameti femminili, contenenti una copia di ciascun cromosoma più un cromosoma sessuale X).

Durante la fecondazione avviene la fusione tra i due gameti (aploidi), lo spermatozoo e l'ovulo, con la formazione dello zigote (diploide) dal quale si sviluppa un nuovo individuo, che eredita due corredi di cromosomi e quindi di geni, uno dal padre e uno dalla madre.

Illustrazione di Marco Marzola

IN BREVE

Ancora oggi la malaria uccide quasi mezzo milione di persone all'anno in tutto il mondo, nonostante l'adozione di sistemi di controllo come la riduzione delle aree di riproduzione della zanzara che trasporta il parassita responsabile della malattia, farmaci, vaccini, zanzariere.

Una nuova promettente strategia per la lotta alla malaria prevede l'impiego del gene drive, una tecnologia che può diffondere modifiche genetiche a tutti gli individui delle popolazioni di zanzare.

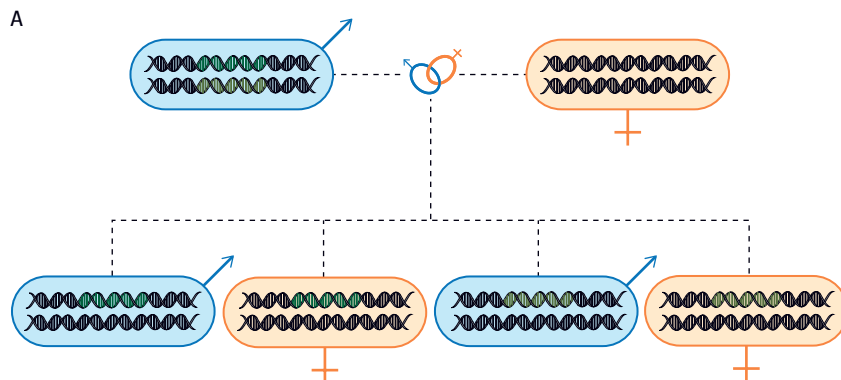
In particolare il gene drive potrebbe ridurre la fertilità delle zanzare femmina (i maschi non trasmettono la malaria); ridurre la possibilità di accoppiamento tra maschi e femmine; ridurre la capacità di trasmettere il parassita e quindi la malattia.

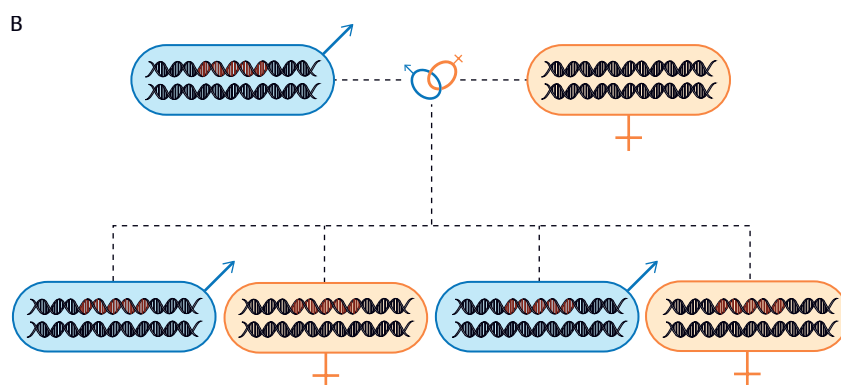
L'ingegnerizzazione di sistemi gene drive per il controllo della malaria è a uno stadio iniziale, con un importante impegno italiano in termini sia di ricercatori sia di strutture che ospitano gli esperimenti.

nes (*HEG*) e si trovano comunemente nei lieviti e nelle alghe. Questi elementi sono caratterizzati da una sequenza genica inserita nel genoma ospite che codifica per un enzima (chiamato endonucleasi) in grado di tagliare il DNA con grande precisione proprio in corrispondenza del punto di inserzione degli *HEG*; una volta operato il taglio, questi elementi copiano la propria sequenza genica durante la riparazione del DNA danneggiato.

Per esempio, un organismo eterozigote per la presenza di una sequenza *HEG* (cioè *HEG* è presente solo in uno di due alleli) dovrebbe trasmettere questo gene al 50 per cento della progenie in accordo con le leggi dell'ereditarietà. Se però l'*HEG* ereditato da un solo genitore si attiva durante la formazione dei gameti, si verifica un taglio selettivo nella regione corrispondente del cromosoma ereditato dall'altro genitore, che attiva il processo di riparazione del DNA. Questo processo usa come stampo il doppio filamento

Le frequenze di geni e il gene drive

A

Gli organismi che si riproducono sessualmente hanno due corredi cromosomici (DNA cromosomico in grigio), uno ereditato dal padre e uno dalla madre. Ogni singolo gene è presente in due copie (la prima rappresentata in verde scuro, la seconda in verde chiaro) ognuna delle quali ha una probabilità del 50 per cento di essere trasmessa alla prole.

B

Il gene drive (*in rosso*) sfrutta una varietà di meccanismi molecolari per assicurare che il DNA codificante il gene drive stesso, o i cromosomi che lo contengono, siano ereditati in modo preferenziale fino a raggiungere una frequenza di trasmissione del 100 per cento.

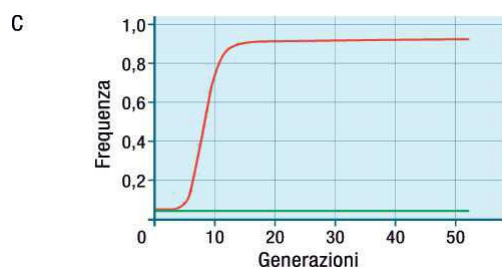
C

Un gene o una modifica genica non sono in grado di aumentare spontaneamente le proprie frequenze nella popolazione, ma rimangono stabili nel caso non determinino una diminuzione della fitness (cioè della capacità di generare prole) dell'individuo (*in verde*); in caso contrario (diminuzione della fitness) scomparirebbero gradualmente dalla popolazione stessa per le leggi della selezione naturale. Nonostante inizialmente sia introdotto in una percentuale molto bassa, il gene drive ha la capacità di aumentare la propria frequenza espandendosi rapidamente nella popolazione obiettivo in poche generazioni (*in rosso*).

Illustrazione di Marco Marzola

di DNA in cui è inserito *HEG*. Così la sequenza *HEG* è copiata sul cromosoma danneggiato ed è trasmessa a tutta la progenie come fosse un tratto omozigote (*si veda il box in questa pagina*).

I geni *HEG* sono selettivi e tagliano solo le sequenze di DNA di lievito che si trovano nella regione del genoma in cui si sono inseriti; ma è possibile reindirizzarne l'azione verso altre regioni modificando la sequenza degli *HEG*. La possibilità di ingegnerizzare gli *HEG* riprogrammandone la specificità per sequenze diverse da quelle del lievito ha ispirato un approccio per il controllo di organismi dannosi per l'essere umano e l'ambiente, ponendo le basi per un nuovo capitolo nella lotta contro la malaria.

Anni fa il nostro gruppo ha indagato l'uso degli *HEG* per diffondere modifiche genetiche nel principale vettore malarico, *Anopheles gambiae*. Abbiamo inserito la sequenza codificante per un'endonucleasi in una sequenza bersaglio di un cromosoma; volevamo valutare la capacità dell'endonucleasi di replicarsi sul cromosoma omologo, ereditato dall'altro genitore, con la medesima sequenza bersaglio, ma intatta. Come spiegato su «Nature» nel 2011, abbiamo usato promotori per assicurare che l'enzima che taglia il DNA venisse prodotto solo nella generazione dei gameti; in questo modo abbiamo dimostrato che l'enzima può tagliare selettivamente la sequenza bersaglio sul cromosoma omologo, diffondendo nella popolazione il gene da cui è codificato.

Il nostro laboratorio ha anche dimostrato che qualsiasi tipo di enzima in grado di tagliare sequenze di DNA con elevata specificità – tra cui *zinc finger nucleases* (ZFN), *transcription activator-like*

R Ripper/Brazil Photos/LightRocket via Getty Images

Reti di contenimento. Per prevenire le punture delle zanzare responsabili della malaria, questi bambini di un villaggio della foresta amazzonica brasiliana riposano in letti avvolti da zanzariere.

effector nucleases (TALEN) e *clustered regularly interspaced short palindromic repeats* (CRISPR) – se attivato durante il processo di formazione dei gameti, può funzionare come gene drive.

Anni fa, quando sono state descritte per la prima volta le caratteristiche di CRISPR, ci siamo subito resi conto dei vantaggi offerti da questa tecnica per sviluppare gene drive in grado di interferire con la trasmissione della malaria da parte di *Anopheles*. CRISPR si distingue dagli altri enzimi per la facilità con cui è possibile riprogrammarne l'attività, permettendo di attaccare qualsiasi sequenza del genoma della zanzara. Questo enzima è composto da due subunità: Cas9, una molecola capace di tagliare il DNA, e un filamento di RNA che posiziona Cas9 in corrispondenza delle regioni del DNA da tagliare, determinando la specificità per il bersaglio. Se si cambia la sequenza dell'RNA, è possibile programmare con grande precisione la sequenza del DNA dove Cas9 effettuerà il taglio, facilitando l'ingegnerizzazione di enzimi in grado di tagliare sequenze d'interesse nel genoma della zanzara.

Le modifiche genetiche per il controllo delle zanzare seguono tre strategie: riduzione della fertilità femminile, attraverso la diffusione di mutazioni che distruggono geni coinvolti nella produzione e maturazione delle uova, per ridurre la capacità riproduttiva della popolazione; riduzione della possibilità di accoppiamento, alterando il rapporto tra maschi e femmine per favorire la produzione di progenie solo maschile fino al collasso della popolazione; riduzione della capacità di trasmettere il parassita, rendendo le zanzare immuni alla malaria tramite la distruzione di geni essenziali per la trasmissione dei parassiti. I primi due sono metodi per la soppressione della popolazione di zanzare, il terzo è per il rimpiazzo o la sostituzione. Esperimenti preliminari hanno mostrato che ognuno degli approcci è promettente, con meriti e considerazioni.

Distruzione di geni

Secondo modelli matematici, il modo più semplice ed efficace per ridurre una popolazione di zanzare sarebbe l'uso di un enzima come gene drive per distruggere selettivamente un gene essenziale per la fertilità delle femmine. La sequenza di DNA che codifica per l'enzima o il complesso enzimatico (CRISPR per esempio) possono essere inseriti nella sequenza di DNA del gene *target* interrompendone l'espressione e di conseguenza il corretto il funzionamento.

Gli individui omozigoti, due copie intatte del gene, sono fertili. Gli eterozigoti, con una sola copia intatta, sono ancora fertili. In questi individui l'attivazione del gene drive durante la meiosi permette la trasmissione del gene distrutto, contenente la sequenza che codifica per l'enzima, alla maggioranza dei gameti e di conseguenza a tutta la progenie. In questo modo la frequenza del gene distrutto aumenta progressivamente nella popolazione rendendo sempre più individui eterozigoti per la mutazione genetica. Quando gli individui eterozigoti inizieranno ad accoppiarsi, la progenie prodotta avrà entrambe le copie del gene distrutte. In questo caso le femmine saranno sterili, mentre i maschi continueranno a trasmettere la mutazione finché tutte le femmine della popolazione saranno state sterilizzate (*si veda l'illustrazione A nel box a p. 36*).

Il nostro gruppo ha recentemente individuato tre geni di *Anopheles gambiae* coinvolti in vari stadi di sviluppo nella produzione di uova e che possono essere considerati bersagli idonei per questo approccio. Nel 2015 su «Nature Biotechnology» abbiamo dimostrato che un gene drive basato su un sistema CRISPR-Cas9 progettato per distruggere uno di questi geni può rapidamente invadere popolazioni di zanzare allevate in laboratorio.

Riduzione dell'accoppiamento

La malaria è trasmessa solo dalle zanzare femmine, quindi qualsiasi intervento che induca un aumento della frequenza di maschi nella progenie ha due effetti positivi: genera una diminuzione della trasmissione della malattia e, con l'aumentare delle frequenza dei maschi, porta al collasso della popolazione per esaurimento delle coppie riproduttive.

Nel nostro laboratorio abbiamo dimostrato che in *Anopheles gambiae* il cromosoma X (uno dei due cromosomi che determinano il sesso, l'altro è l'Y) può essere distrutto in modo selettivo durante la maturazione dello sperma; abbiamo ottenuto questo risultato grazie a enzimi che tagliano selettivamente una sequenza di DNA localizzata solo sul cromosoma X in diverse centinaia di copie in queste specie di zanzare (in teoria qualsiasi sequenza X-specifica potrebbe essere un obiettivo). L'attività dell'enzima, ancora un'endonucleasi, come mostrato su «Nature Communication» nel 2014, o CRISPR, come illustrato nel 2016 su «Scientific Reports», determina una frammentazione del cromosoma X, così solo gli spermatozoi portatori del cromosoma Y completano il processo di maturazione e fertilizzano gli ovociti (gli spermatozoi reca-

Elementi controversi

Negli ultimi tempi i gene drive e le potenziali applicazioni di questi elementi genetici in grado di autopropagarsi sono stati protagonisti di dibattiti e scandali in stile WikiLeaks

Un allarme accorato, un impegno solenne, persino uno scandalo in stile WikiLeaks. È innegabile che quello che sta per finire sia stato un inverno caldo per l'immagine pubblica dei *gene drive*.

In futuro questi elementi genetici capaci di autopropagarsi potrebbero consentirci di tenere sotto controllo intere popolazioni selvatiche dannose per l'essere umano oppure per l'ambiente, facilitando la trasmissione ereditaria di geni di interesse. Ma arrivare al traguardo sarà impossibile se i ricercatori non riusciranno a meritarsi un pezzetto per volta la fiducia di cittadini e regolatori. L'accelerazione del dibattito pubblico degli ultimi mesi, comunque, non dovrebbe trarre in inganno: lo *storytelling* di questo filone di ricerca è ancora in via di costruzione, e ci vorrà tempo prima che la tecnologia possa uscire dai laboratori per essere sperimentata all'aperto in condizioni controllate.

Raccontare un'innovazione avveniristica accontentandosi di vecchi stereotipi e schemi di interpretazione consumati sarebbe un gran peccato. La bussola migliore, per chi vuole orientarsi nel polverone sollevato dalle narrazioni conflittuali, è la capacità di valutare circostanze e sfumature, caso per caso. Innanzitutto è fondamentale distinguere tra due grandi campi di applicazione: usare i gene drive negli insetti per bloccare la trasmissione di gravi malattie infettive come la malaria è una sfida profondamente diversa, anche sul piano tecnico, rispetto a impiegarli per proteggere la biodiversità degli ecosistemi minacciati dalla proliferazione di mammiferi invasivi come i ratti. In secondo luogo bisogna tenere presente che, anche all'interno di uno stesso ambito applicativo, i gene drive non sono tutti uguali. Potenzialità e rischi potranno variare in modo rilevante a seconda di come saranno progettati e usati.

Queste premesse sono necessarie per inquadrare correttamente il significato dell'allarme che ha fatto notizia di recente. Secondo un modello matematico presentato da un gruppo della Harvard University e del Massachusetts Institute of Technology (MIT), i gene drive testati finora nei laboratori (in condizioni di biosicurezza certificate) sono troppo potenti per pensare di servirsene come armi contro le specie invasive. Supponiamo che un domani si decida di usarli al posto di trappole e veleni per eliminare una popolazione di ratti che altrimenti porterebbe all'estinzione gli uccelli o i rettili nativi di un'isola, come racconta Stephen S. Hall a p. 38. Secondo i calcoli di Kevin Esvelt del MIT e colleghi, pubblicati su bioRxiv il 16 novembre 2017, il processo potrebbe sfuggirci di mano. La modificazione genetica sarebbe infatti così persistente da rischiare di diffondersi in popolazioni di ratti che vivono in altre aree geografiche oltre a quella scelta per l'intervento, e non possiamo contare sul fatto che l'insorgere del fenomeno naturale della resistenza basti a porre un freno. La breccia nel confinamento potrebbe aprirsi in modo accidentale, se qualche animale modificato riuscisse a lasciare l'isola, o deliberatamente, per l'iniziativa di qualche persona senza scrupoli, interessata a disfarsi dei roditori anche al di fuori del sito sperimentale e senza le autorizzazioni del caso.

Il modello matematico citato ha il pregio di essere stato costruito sulla base dei dati pubblicati in letteratura su lieviti, moscerini e zanzare, ma è molto semplificato, quindi è difficile capire quanto sia rappresentativo di quello che potrebbe accadere nel mondo reale. Esvelt ha comunque tratto conclusioni forti dai risultati di queste simulazioni matematiche, firmando

un commento su «PLoS Biology» insieme al conservazionista Neil Gemmell, della neozelandese Università dell'Otago. I due studiosi si rivolgono in particolare alla Nuova Zelanda, che ha avviato un ambizioso programma per l'eliminazione delle specie invasive (Predator Free 2050), auspicando che il paese decida di non autorizzare rilasci sperimentali nell'ambiente, anche se a dire il vero nessun esperimento del genere è mai stato annunciato. Il ricercatore del MIT si dichiara pentito di aver guardato con favore in passato a questo tipo di applicazioni, e al tempo stesso ribadisce il suo sostegno all'impiego della tecnologia in chiave antimalarica. Il potenziale degli esperimenti descritti da Andrea Crisanti e Roberto Galizi, dunque, non viene messo in discussione sulla base dei nuovi dati.

Le preoccupazioni di Esvelt sulle applicazioni finalizzate alla gestione delle specie invasive sono apparse ad altri specialisti eccessive e premature, come documenta il campionario delle reazioni raccolte dal Science and Media Center neozelandese. «Le Scienze» ha chiesto un parere a John Godwin, che lavora allo sviluppo di diversi tipi di drive per il topo alla North Carolina State University, e anche lui esprime qualche dubbio sul valore di un simile allarme. «Vale la pena notare che, per quanto se ne sa, non ci sono ricercatori né organizzazioni che propongano di applicare questo tipo di drive

Voyagerix/iStock

Piccolo e (a volte) pericoloso. Il ratto marrone è diffuso in tutto il mondo e in alcuni contesti è diventata una specie invasiva pericolosa, motivo per cui alcune applicazioni di gene drive riguardano proprio questo roditore.

potenzialmente invasivi per scopi di conservazione», ci ha detto lo scienziato. Di fatto non esistono ancora dimostrazioni di gene drive artificiali funzionanti nei vertebrati, e i primi rilasci sperimentali di questo tipo non potranno avvenire prima di 7-10 anni, assicura Godwin. In queste condizioni chiedere una moratoria sugli esperimenti a fini di conservazione sarebbe come gridare al lupo pur sapendo che in giro attualmente non c'è nemmeno un cagnolino e in futuro saranno ammessi solo esemplari addomesticati e con la museruola. I genetisti sono infatti già impegnati a sviluppare gene drive più sofisticati, controllabili, adatti ai vari scopi.

Quelli che sono stati sperimentati in laboratorio negli ultimi anni rientrano nella categoria dei gene drive artificiali standard e si basano prevalentemente sulla tecnologia CRISPR. Ma nel genoma dei topi, per esempio, esistono anche drive naturali, che potrebbero suscitare minore diffidenza. Anche la scelta del gene da diffondere è importante, perché è possibile modificare una caratteristica dannosa negli organismi bersaglio oppure mirare all'eliminazione degli organismi problematici tout court.

I gene drive di soppressione sembrerebbero meno aggressivi di quelli di rimpiazzo, almeno sulla carta, e più idonei per le strategie di conservazione. Inoltre per le varianti di prossima generazione si stanno facendo avanti i primi candidati, pensati per esercitare un maggior controllo sul processo. L'idea è di fare in modo che la «reazione genetica a catena» si arresti dopo un certo numero di generazioni o rimanga circoscritta a una particolare popolazione bersaglio, perché si concentra su caratteristiche genetiche fissate localmente (drive locali).

«Penso che tutti possiamo concordare che i drive progettati per eliminare solo una ben precisa popolazione locale bersaglio possono essere confinati in modo sicuro e rappresentano un'opzione ragionevole per la conservazione. I richiami alla cautela sono stati esagerati e non riconoscono il grande impegno profuso nella ricerca dai nostri partner e colleghi», ci ha detto Heath Packard, che cura la comunicazione per l'organizzazione Island Conservation. Sia Godwin che Esvelt, in effetti, sono tra i beneficiari dei finanziamenti erogati dal Department of Defense degli Stati Uniti per il programma Safe Genes, e si trovano in ottima compagnia con nomi di peso come Jennifer Doudna e George Church.

Il coinvolgimento della DARPA, l'agenzia per le tecnologie emergenti di interesse militare, ha messo in allarme gli oppositori dei gene drive: guerra e genetica insieme non fanno un bell'effetto. Ma in fondo l'esistenza di questo programma dimostra che l'enfasi della ricerca è posta proprio sulla necessità di rafforzare il livello di sicurezza della tecnologia prima di cominciare a considerare eventuali rilasci ambientali. I primi a non voler correre rischi sono i sostenitori dei gene drive, perché se il debutto in campo aperto dovesse essere macchiato da qualche incidente, difficilmente una tecnologia così controversa potrebbe sopravvivere al danno di immagine. La consapevolezza di quanto sia importante coltivare la cultura dell'innovazione responsabile, evitando fughe in avanti, è evidente anche nei principi guida sottoscritti recentemente dai maggiori sponsor del filone di ricerca - dalla Bill & Melinda Gates Foundation ai Tata Trusts indiani, dal Wellcome Trust britannico al francese INSERM – e pubblicati il 1° dicembre dello scorso anno su «Science» in un *policy forum* che vale come un solenne impegno.

Quanto allo scandalo in stile WikiLeaks, si è consumato il 4 dicembre, alla vigilia di un meeting sulla Convenzione della diversità biologica delle Nazioni Unite. I mezzi di comunicazione hanno potuto accedere a oltre 1000 e-mail, spedite e ricevute da specialisti statunitensi del campo, ottenute grazie al Freedom of Information Act da ETC Group, una ONG che si è già distinta per le contestazioni all'uso delle biotecnologie in agricoltura. A ben vedere i messaggi dei ricercatori non hanno rivelato granché di scandaloso, nota un editoriale di «Nature», ma intanto il polverone è stato sollevato.

Le tensioni non mancano, dunque, eppure rappresentare i gene drive come un braccio di ferro tra scienziati e ambientalisti sarebbe una mezza verità, perché la scienza sta facendo uno sforzo di apertura e di dialogo. «Penso che quest'area di ricerca sia tutto sommato un buon modello di collaborazione produttiva tra genetisti e ricercatori focalizzati sull'ecologia, con il coinvolgimento di matematici, specialisti di valutazione del rischio, scienziati sociali e altre figure», ci ha detto Godwin concludendo con una nota di ottimismo. «Personalmente sono incoraggiato dalla risposta dei conservazionisti con cui ho potuto parlare del potenziale dei gene drive per la gestione delle specie invasive. Queste persone conoscono il problema e i limiti degli strumenti oggi disponibili. Probabilmente è per questo che riconoscono il bisogno di una ricerca responsabile su approcci innovativi».

Anna Meldolesi

Science writer («Corriere della sera», «Nature Biotechnology»). È autrice di numerosi libri, tra cui E l'uomo creò l'uomo. CRISPR e la rivoluzione dell'editing genomico (*Bollati Boringhieri, 2017*).

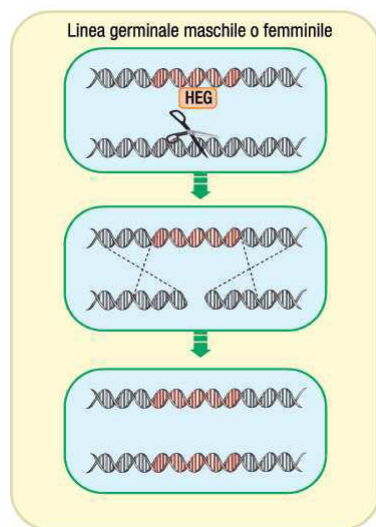
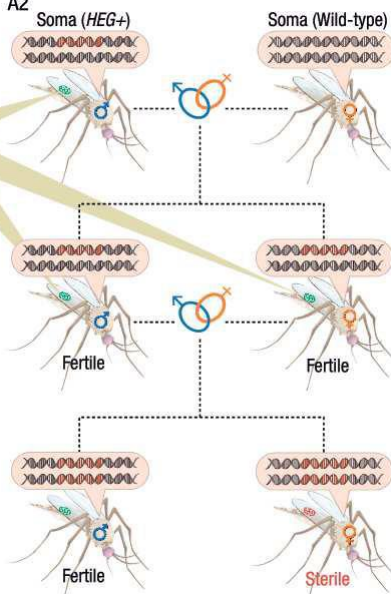
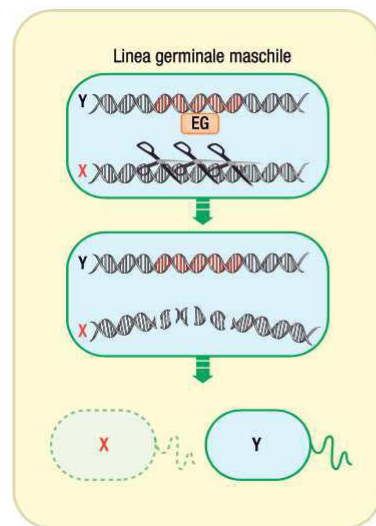
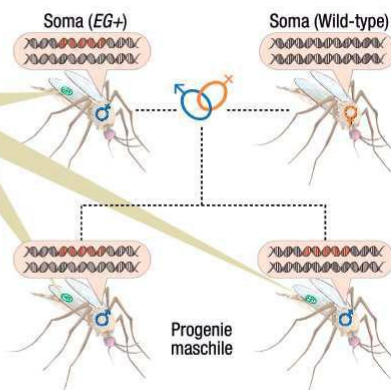
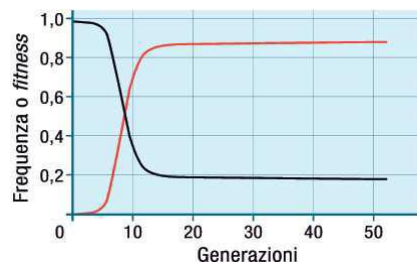
Femmine infertili e sempre più maschi

Nella meiosi (*A1*) i cromosomi ereditati dal padre e dalla madre si appaiano, portando in prossimità della sequenza dove è inserito un gene *HEG* la regione di DNA corrispondente del cromosoma omologo: il doppio filamento di DNA (*in grigio*) è di un gene della fertilità. A questo punto l'enzima codificato da *HEG* taglia la sequenza corrispondente che non contiene il gene dell'endonucleasi (allele *wild-type*), costringendo la macchina di riparazione del DNA cellulare a usare il cromosoma con il gene dell'endonucleasi (allele HEG+) come stampo. L'accoppiamento (*A2*) di un eterozigote con un wild-type genera per lo più eterozigoti, riducendo a ogni generazione quelli wild-type. Gli eterozigoti inizieranno ad accoppiarsi tra loro e la progenie avrà entrambe le copie del gene distrutte. Le femmine saranno sterili, e i maschi continueranno a trasmettere la mutazione finché tutte le femmine della popolazione saranno state sterilizzate.

Durante la meiosi (*B1*) maschile viene attivata la sequenza genica codificante per l'endonucleasi, localizzata nel cromosoma Y. L'enzima riconosce e taglia sequenze di DNA presenti in molteplici copie esclusivamente sul cromosoma X della zanzara, che viene così frammentato. In questo modo solo gli spermatozoi portatori del cromosoma Y sono in grado di completare il processo di maturazione. Quando questi maschi transgenici si accoppiano con femmine wild-type (*B2*), sono in grado di trasmettere quasi esclusivamente il cromosoma sessuale Y, e generare quindi una progenie soprattutto maschile e portatrice di *HEG*, che a sua volta produce lo stesso effetto nelle generazioni successive, causando una graduale riduzione del numero di femmine.

I gene drive come quelli illustrati in *A* e *B* hanno la capacità di propagarsi nella popolazione a partire da frequenze di rilascio molto basse (*in rosso*). Grazie alla capacità di interferire con la fertilità delle femmine (*rappresentata in A*) o di generare una progenie unicamente maschile (*rappresentata in B*), la popolazione obiettivo subisce una progressiva riduzione in numerosità e fitness (*in nero*).

Illustrazione di Marco Marzola su indicazione degli autori; adattamento da *Site-specific selfish genes as tools for the control and genetic engineering of natural populations*, di A. Burt, in «Proceedings of the Royal Society B», Vol. 270, n. 1518, 7 marzo 2003.

no solo uno dei due cromosomi sessuali). In queste zanzare il 95 per cento di tutti gli spermatozoi vitali contengono l'Y, e quindi la progenie risulta composta quasi esclusivamente da individui maschi (caratterizzati dai cromosomi sessuali X e Y), azzerando quasi completamente il numero di zanzare femmina (coppia di cromosomi sessuali XX) generate (*si veda l'illustrazione B nel box a fronte*).

Attualmente lavoriamo per accoppiare le endonucleasi a un gene drive in modo che possano essere ereditate da tutta la progenie maschile, , per esempio inserendo il gene codificante per l'enzima nel cromosoma Y, aumentandone così la frequenza di generazione in generazione fino all'estinzione della popolazione a causa della carenza di femmine necessarie per l'accoppiamento.

Non suscettibili alla malattia

Un'altra opzione offerta dal gene drive è la diffusione di modifiche genetiche che rendano le zanzare immuni alla malaria e quindi impossibilitate a trasmetterla. Questo traguardo può essere raggiunto distruggendo i geni della zanzara sfruttati dal parassita per infettare l'insetto; per esempio, geni che codificano per strutture molecolari chiamate recettori che permettono al plasmodio di invadere intestino e ghiandole salivari della zanzara, oppure inserendo nel genoma dell'insetto geni in grado di riconoscere e neutralizzare selettivamente il parassita, per esempio che codifichino per anticorpi legati a tossine.

La decisione di implementare una tecnologia come il gene drive dovrebbe essere presa dalle comunità colpite dalla malaria

Alcuni ricercatori hanno proposto di inserire geni che codificano per peptidi (proteine di piccola taglia) antimicrobici nel genoma della zanzara. Risultati preliminari – pubblicati nel 2015 da Valentino M. Gantz, dell'Università della California a San Diego, e colleghi sui «Proceedings of the National Academy of Sciences» – indicano che zanzare *Anopheles stephensi* (principale responsabile della trasmissione di *Plasmodium falciparum* in India), modificate per produrre anticorpi diretti contro proteine del parassita che causa la malaria nei topi (*Plasmodium berghei*, usato come modello per lo studio della malaria), possono bloccarne lo sviluppo e quindi immunizzare le zanzare. Questi studi sono in una fase preliminare; dovranno essere estesi ad altre specie di zanzare e mostrare efficacia contro *Plasmodium falciparum*, il parassita della malaria umana.

Dal laboratorio al campo

La tecnologia del gene drive offre una grande flessibilità di impiego ed enormi potenzialità per il controllo di vettori portatori di malattie. A differenza di molti altri sistemi di controllo, il gene drive può agire su una specie ben determinata, può essere autosostenibile e quindi può rappresentare un rimedio a lungo termine con costi sostenibili. Inoltre è una tecnologia che può essere complementare ad altri sistemi di controllo, come vaccini e farmaci, o altri approcci convenzionali come insetticidi e zanzariere.

L'ingegnerizzazione di sistemi gene drive per il controllo della malaria è a uno stadio iniziale, e ogni approccio dovrà superare una serie di fasi di validazione, dal laboratorio al rilascio confinato, prima di essere valutato sul campo. Con il progetto Target Malaria, finanziato dalla Bill & Melinda Gates Foundation, abbiamo costruito camere climatiche (situate presso il Polo di genomica, genetica e biologia nei laboratori di Perugia e Terni); queste camere simulano le condizioni tropicali in cui le zanzare vivono, quindi permettono di valutare efficacia, stabilità e dinamica di diffusione di gene drive su popolazioni di zanzare confinate in gabbie ad alto grado di sicurezza e isolamento ecologico. Nonostante l'azione del gene drive sia progettata per permetterne la diffusione, il processo di evoluzione determina lo sviluppo di meccanismi di resistenza che rendono la zanzara immune alla diffusione del gene drive.

Uno dei meccanismi di resistenza più comuni è la variazione della sequenza di DNA del sito bersaglio riconosciuto dall'endonucleasi. Questa variazione può essere preesistente nella popolazione o generata nel processo di riparazione del taglio. In entrambi i casi la sequenza bersaglio differisce da quella originale e non può più essere tagliata dalla stessa endonucleasi. Se poi queste sequenze dovessero conferire un vantaggio selettivo, potrebbero diffondersi, annullando la capacità di propagazione del gene drive. Per mitigare il rischio sono state proposte strategie come la selezione di sequenze bersaglio altamente conservate per limitare la probabilità che le varianti possano generare un gene funzionale e resistente al gene drive. In alternativa, il gene drive può essere ingegnerizzato per colpire più di una sequenza bersaglio nello stesso gene.

Qualsiasi gene drive efficace in laboratorio dovrà essere poi valutato in condizioni di confinamento ecologico, con gabbie di grandi dimensioni che riproducono le condizioni climatiche tropicali per testare efficacia, stabilità e dinamica di diffusione su grandi numeri. Inoltre dovranno essere effettuati studi per esaminare distribuzione, eterogeneità genetica e flusso genico delle diverse specie di zanzare presenti nelle aree di rilascio del gene drive.

Come per altre tecnologie innovative, anche per il gene drive sarà indispensabile effettuare una valutazione delle implicazioni etiche ed ecologiche legate al suo impiego. In questa direzione, la comunità scientifica ha concordato linee guida per sviluppo, realizzazione e contenimento di questa tecnologia, seguendo adeguate misure di sicurezza. Una recente relazione della statunitense National Academies of Science, Engineering, and Medicine ha incoraggiato un approccio precauzionale e studi approfonditi per la costruzione, la valutazione e l'adozione del gene drive. Oltre all'importanza di avere linee guida, l'adozione del gene drive per il controllo di organismi nocivi dovrà essere valutata caso per caso, considerando rischi e benefici associati al controllo di una data malattia.

La malaria causa enormi sofferenze umane e gravi danni alla società e all'economia di molti paesi in via di sviluppo, nonostante i gravosi interventi messi in atto finora. La decisione di adottare una tecnologia come il gene drive non dovrebbe essere presa dagli gli scienziati che progettano la tecnologia, bensì da paesi e comunità colpiti dalla malattia. Questo richiederà un dialogo aperto, che deve coinvolgere tutti i soggetti interessati per raggiungere un'intesa prima di usare la tecnologia sul campo. ■

PER APPROFONDIRE

The Creation and Selection of Mutations Resistant to a Gene Drive over Multiple Generations in the Malaria Mosquito. Crisanti A. e altri, in «PLoS Genetics», Vol. 13. n. 10, e1007039, 4 ottobre 2017.

Site-Specific Selfish Genes as Tools for the Control and Genetic Engineering of Natural Populations. Burt A., in «Proceedings of the Royal Society B», Vol. 270, n. 1518, 7 marzo 2003.

Stable Germline Transformation of the Malaria Mosquito *Anopheles stephensi*. Crisanti A. e altri, in «Nature», Vol. 405, n. 6789, pp. 959-962, 22 giugno 2000.

Gene Drives on the Horizon. National Academies of Science, Engineering, and Medicine, 2016. **https://doi.org/10.17226/23405.**

L'ingegneria genetica può salvare le Galápagos?

di Stephen S. Hall

Le iguane marine delle Galápagos sono preda dei gatti inselvatichiti e di altri predatori invasivi.

Nell'arcipelago delle Galápagos le specie invasive stanno portando all'estinzione diversi animali autoctoni. Alcuni conservazionisti si chiedono se la manipolazione genetica possa essere la soluzione del problema

Stephen S. Hall è uno scrittore scientifico pluripremiato e collabora abitualmente con diverse testate. Di recente ha pubblicato *Wisdom: From Philosophy to Neuroscience* (Knopf, 2010).

Il 25 settembre 1835, durante la sua visita all'arcipelago delle Galápagos a bordo dell'*HMS Beagle*, Charles Darwin mise piede per la prima volta su quella che all'epoca era ancora chiamata Charles Island. Vi trovò una colonia di 200-300 abitanti, quasi tutti esiliati politici inviati dall'Ecuador in seguito a un fallito colpo di Stato. Darwin non rimase particolarmente colpito dalle pianure, con i loro «boschetti spogli», ma dopo essersi addentrato per sei chilometri nell'entroterra e aver raggiunto un piccolo e misero insediamento sulle colline, trovò una «vegetazione rigogliosa e lussureggiante», coltivata a banane e patate dolci, e un gruppo di isolani che «pur lamentandosi della povertà, ottenevano, senza troppa fatica, i mezzi per la loro sussistenza».

Era soprattutto per le decine di migliaia di tartarughe giganti che una volta si aggiravano sulle isole. «Nei boschi – annotò Darwin, quasi come se se ne fosse reso conto solo più tardi – ci sono molti maiali e capre selvatici».

La mattina del 25 agosto 2017 Karl Campbell è saltato giù da una barca bimotore sul molo di quella stessa umile isola, oggi chiamata Floreana. Conta 144 residenti, la metà di quelli che la popolavano ai tempi di Darwin, e Campbell sembrava conoscerli tutti. Con cappellino da baseball, jeans e maglietta grigia con la scritta «Island Conservation», si è diretto con calma verso Claudio Cruz, che sedeva al volante di un autobus locale (un camion convertito, con le panche sul retro), per scambiare due battute. Con un gesto della mano ha salutato Joselita e Joselito, che presidiavano sul molo il posto di controllo del governo ecuadoriano per la biosicurezza. Ha gridato un altro «Hola!» al direttore dell'ufficio postale, infilato la testa nel centro civico per salutare Myra e Holger, un agricoltore, e si è fermato a parlare con Carmen, la custode dei bagni pubblici vicini all'approdo. Il suo cammino lungo l'unica strada asfaltata di Floreana è stato rallentato da saluti, chiacchiere, battute e baci su una guancia, come si usa in Ecuador.

Campbell, australiano, 42 anni, vive alle Galápagos da vent'anni: è un tipo socievole, ed è solito attaccare discorso con: «Tutto bene, amico?». Ma l'atteggiamento allegro e bonario di quella mattina era una parte fondamentale di un'enorme impresa scientifica. Campbell ha un PhD in gestione dei vertebrati infestanti all'Università del Queensland, in Australia, e nel 2006 ha iniziato a collaborare come specialista della rimozione animale con Island Conservation, un'organizzazione con sede a Santa Cruz, in California, impegnata nella salvaguardia della biodiversità e nella prevenzione delle estinzioni nelle isole di tutto il mondo tramite la rimozione delle specie invasive. Dal 1997 Campbell si dedica a interventi di eliminazione nelle Galápagos, e nel 2006 ha seguito un'operazione per eliminare capre e asini inselvatichiti da Floreana. Oggi, dopo dieci anni, Campbell è *project manager* di Island Conservation, e Floreana è di nuovo teatro del suo progetto più ambizioso: l'eliminazione di tutti i ratti e i topi presenti sull'isola.

Ci sono centinaia di migliaia di isole nel mondo. «Non è possibile intervenire su tutte», ammette Campbell. Secondo lui, i conservazionisti «attualmente sono in grado di occuparsi di 10-20 isole all'anno, per liberarle dai topi. Quali sono allora le isole su cui bisogna agire con più urgenza? Abbiamo redatto un elenco dei luoghi in cui dovremmo adoperarci per prevenire le estinzioni». In cima all'elenco c'è Floreana.

«Floreana ha uno dei tassi di endemismo più elevati delle Galápagos, il tasso più alto di estinzioni dovute a specie invasive e il tasso di gran lunga più elevato di specie a rischio, per questo è tra gli obiettivi prioritari non solo nelle Galápagos, ma in tutto il mondo», dice Campbell, con una cantilena che ha tutta la forbitezza e l'urgenza di un discorso ripetuto infinite volte a finanziatori, giornalisti e forse anche a ogni singolo abitante dell'isola.

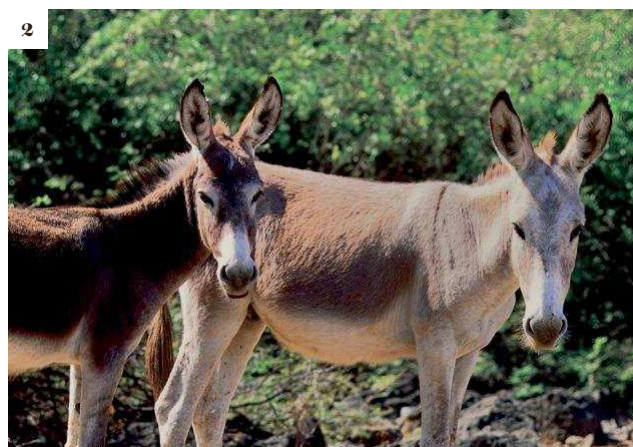
Con gli attuali strumenti di eliminazione, Floreana è un progetto al limite del realizzabile. L'isola è grande (17.253 ettari) ed è popolata, e questo complica la questione: bisogna spiegare agli abitanti la logistica e le conseguenze dell'intero progetto, compresa l'intenzione di riversare 400 tonnellate di veleno per roditori su tutta l'isola. Ecco perché, dal 2012, Campbell e i suoi colleghi, tra i

IN BREVE

Le specie invasive sono un problema per le Galápagos fin da quando i primi marinai sbarcarono sulle isole. Centinaia di specie alloctone di piante, insetti, rettili, uccelli e mammiferi vivono nell'arcipelago, a discapito delle specie autoctone, che in alcuni casi ne diventano preda.

Eliminare le specie invasive può essere un compito brutale. Un progetto per eliminare i roditori che saccheggiano i nidi degli uccelli e dei rettili originari di Floreana prevede l'impiego di 400 tonnellate di veleno e l'isolamento di animali domestici, bestiame e forse anche bambini per settimane.

La manipolazione genetica, per esempio, l'alterazione dell'ereditarietà nei roditori al fine di generare una popolazione con progenie solo maschile, e quindi di impedirne la riproduzione, è oggi oggetto di dibattito in quanto potenziale alternativa al veleno e alla caccia. Ma quali sono i rischi? E quali le certezze sulla sua efficacia?

Pagine precedenti: Tui De Roy

I ratti marroni (*1*) sono uno dei principali bersagli di un vasto progetto di eliminazione delle specie invasive dall'isola di Floreana, dove asini (*2*), bovini (*3*) e molte altre specie alloctone sono state introdotte nel corso dei secoli. Nella vicina isola Isabela, le capre inselvatichite hanno denudato una roccaforte delle tartarughe giganti delle Galápagos (*4*).

Krystyna Szulecka Alamy (*1 e 3*); Wolfgang Kaehler Getty Images (*2*); Tui De Roy (*4*)

quali Carolina Torres e Gloria Salvador, almeno una volta al mese visitano Floreana, sopportando gli scossoni del viaggio di due ore in barca dall'isola di Santa Cruz, la più importante dell'arcipelago, per incontrare i residenti, descrivere il progetto e studiare le complicate misure necessarie per proteggere adulti, bambini, bestiame, risorse idriche e specie a rischio dagli effetti del veleno.

Interventi di eliminazione del genere richiedono una logistica e una precisione quasi militari, ed è per questo che Campbell cerca disperatamente un'alternativa alle aggressive tecniche di eliminazione esistenti. Una delle più interessanti, secondo lui, è una nuova e controversa forma di manipolazione genetica, chiamata *gene drive*. Di fronte alle difficoltà logistiche che deve affrontare tutti i giorni per il progetto di Floreana, questa tecnologia gli sembra quasi una bacchetta magica uscita da un libro di Harry Potter.

La strategia alla base dell'impiego del gene drive in questo contesto sarebbe la modifica del DNA dei topi, ricorrendo a CRISPR – l'innovativa tecnologia di editing genomico – o ad altri strumenti di manipolazione genetica, in modo da alterare le probabilità dell'ereditarietà sessuale: si potrebbe per esempio generare progenie solo maschile, e ottenere una popolazione di topi priva di figlie femmine. L'eliminazione delle femmine costituirebbe un vicolo cieco dal punto di vista riproduttivo per la specie invasiva. Il gene drive è ancora ben lungi dall'essere applicabile, ma Island Conservation collabora da tempo con biologi molecolari statunitensi e australiani per ottenere topi geneticamente modificati, e Campbell non ha celato il suo entusiasmo per questo metodo nelle recenti conferenze scientifiche.

Forse è per questo che in un'analisi del 2016 sui potenziali rischi e benefici del gene drive le National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine hanno incluso proprio l'esempio dei topi senza figlie in possibili scenari di applicazione di questa tecnologia. Il rapporto evidenziava che «la varietà delle percezioni del ruolo degli esseri umani negli ecosistemi e più in generale della loro relazione con la natura – nonché del loro impatto sugli ecosistemi, e la relativa alterazione – è fondamentale nell'ottica del dibattito emergente sul gene drive». In un certo senso, questo dibattito è già iniziato a Floreana, dove da cinque anni i residenti valutano rischi e benefici di una massiccia, seppur non genetica, alterazione del loro prezioso ecosistema.

Campbell è il primo a riconoscere che le Galápagos non saranno il primo posto, né il migliore, per testare sul campo il gene drive. Ma potrebbero essere il luogo ideale per riflettere sulle possibili implicazioni – positive e negative – di questa tecnologia nell'ottica della salvaguardia delle specie. Se, in quanto comunità globale, riteniamo importante preservare e proteggere la biodiversità delle Galápagos (al punto che l'UNESCO ha inserito queste isole nel Patrimonio mondiale dell'umanità), allora dobbiamo anche scendere a patti con le complessità e i paradossi dell'eliminazione delle

specie invasive, che legittima l'eliminazione locale di determinati animali a beneficio di altre specie, non da ultimo quella umana. Come ricorda sempre Campbell, «nessuno viene alle Galápagos per vedere ratti, capre e gatti».

Un'ombra sul paradiso

Nell'immaginario collettivo, le Galápagos sono diventate sinonimo di armonia ecologica e biodiversità autentica, ma purtroppo la realtà è molto diversa. Certo, le tartarughe giganti sono impressionanti, ma se in passato erano in migliaia a farla da padrone sulle colline di Floreana, oggi ne resta circa una ventina di esemplari, tutti importati da altre isole, perché le specie locali si sono estinte. Certo, gli impavidi fringuelli sono graziosi e affascinanti, ma il tordo beffeggiatore di Floreana è scomparso dall'isola intorno al 1880, insieme ad altre 12 specie che si sono estinte a livello locale. Certo, le tartarughe marine che nuotano languidamente al largo della spiaggia La Lobería sono magnifiche, ma vengono puntualmente derubate delle loro uova da predatori indifferenti. Tutte le specie simbolo delle Galápagos sono minacciate da specie invasive.

Un'ombra aleggia sul paradiso delle Galápagos, da molto tempo, forse da quando Tomás de Berlanga, allora vescovo di Panama, deviò dalla rotta e scoprì le isole, nel 1535. I primi veri mammiferi invasivi furono i pirati che frequentavano l'arcipelago nel XVII secolo, seguiti dagli equipaggi delle baleniere nel XVIII secolo. Questi marinai portarono con sé, come su un'arca malefica, una serie di mammiferi deplorevoli, introducendoli su isole che erano rimaste pressoché imperturbate per milioni di anni. A voler essere provocatoriamente precisi, il primo animale invasivo di Floreana documentato dalla storia fu un marinaio irlandese di nome Patrick Watkins, abbandonato sull'isola intorno al 1805. Pare che Watkins coltivasse ortaggi che barattava con le navi di passaggio in cambio di rum (ispirando una storia di Herman Melville).

Tre anni prima dell'arrivo di Darwin, un coacervo di specie invasive degno di uno zoo si era ormai insediato a Floreana. Non è un caso che nella letteratura scientifica il 1832 sia la prima data a cui si fa risalire l'arrivo di molte specie invasive. Quello fu l'anno in cui il generale José de Villamil, primo governatore delle isole Galápagos, approdò a Floreana per organizzare la colonia penale. Per dirla con le parole di Cruz – agricoltore, storico amatoriale, autista occasionale di autobus e principale proprietario terriero di Floreana – il generale «portò di tutto con sé: capre, asini, vacche, muli, cavalli, cani, maiali, topi... di tutto». Importazioni analoghe di animali avvennero su altre isole delle Galápagos nel corso del XIX secolo, con conseguenze devastanti per la flora e la fauna locali. Villamil portò i muli e gli asini per trascinare le tartarughe giù dalle colline. Durante la sua visita, Darwin venne a sapere che una nave approdata precedentemente a Floreana aveva imbarcato 200 tartarughe in un solo giorno (stando a quanto riferisce Darwin, sembra che altre navi ne avessero raccolte fino a 700).

I mammiferi invasivi hanno creato scompiglio nell'ecosistema, in modo diretto e indiretto. Gli asini distruggono le uova di tartaruga quando si rotolano in terra per pulirsi. I gatti inselvatichiti e i topi divorano i piccoli degli uccelli marini e fanno spuntini a base di piccoli del rettile tropidura. Le capre selvatiche che brucano la vegetazione locale, rasandola a zero, privano la popolazione di tartarughe del cibo che l'ha mantenuta in vita per secoli e spianano la strada a piante invasive come la guaiava, ormai diffusa su tutti i rilievi. Che fine ha fatto il serpente corridore delle Galápagos, *Pseudalsophis biserialis*, un tempo comune nelle isole? Sparito. Più di 750 specie vegetali e quasi 500 insetti alloctoni hanno messo radici alle Galápagos. Se in passato queste isole hanno insegnato l'evoluzione al mondo, oggi ci ricordano che la natura non è statica e che a volte gli interventi di conservazione alterano la natura per salvaguardarla.

MAPPA DELLE ISOLE

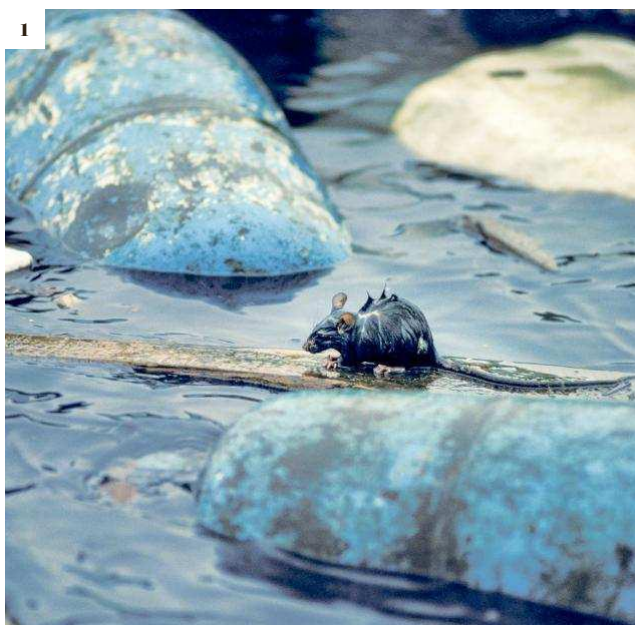
Selezione innaturale

Island Conservation, un'associazione californiana, assiste le autorità ecuadoriane nell'eliminazione di tutti i ratti e i topi di Floreana, una grande isola abitata dell'arcipelago delle Galápagos.

Mappa di Mapping Specialists

La storia è la stessa in tutto l'arcipelago, anche se con capitoli molto peculiari. In un compendio del 2012 sui «vertebrati alloctoni» delle Galápagos, R. Brand Phillips, David A. Wiedenfeld e Howard L. Snell (all'epoca tutti affiliati alla Charles Darwin Research Station di Puerto Ayora a Santa Cruz) hanno identificato 44 specie ospiti indesiderate, di cui quasi la metà ha dato vita a popolazioni selvatiche. L'assortimento spazia da intrusi evidenti come capre, maiali, bestiame e ratti neri a uno sgradito serraglio di animali esotici. La tilapia del Nilo, pesce d'acqua dolce, è comparsa sull'isola di San Cristóbal nel 2006; tre rane sono state avvistate su due isole. Nel corso degli anni sono approdati gechi della specie *Lepidodactylus lugubris*, anatre domestiche, aironi guardabuoi, parrocchetti, pavoni e gracule. Tre scimmie, di specie incerta, sono arrivate a Floreana negli anni trenta, e nel 1937 un imprenditore locale ha cercato di creare una colonia di ozelot, gattopardi americani, sull'isola di Santiago. Gattopardi!

Quanto a ondate di invasione, gli esseri umani non sono da meno, e anche il loro impatto sta aumentando. Nel 1984 si contavano solo 6000 abitanti, distribuiti su cinque delle 129 isole e isolotti; oggi sono più di 30.000. E i turisti? Trent'anni fa se ne registravano 20.000 l'anno; nel 2016 sono stati 218.000. Da quando è aumentato il numero di viaggiatori che visitano le Galápagos per ammirare la biodiversità locale, quella stessa biodiversità è sempre più minacciata dalle specie invasive.

Nel 1971 il Galápagos National Park Service, che controlla il 97 per cento delle terre emerse dell'arcipelago, ha tentato per la prima volta di eliminare le capre dall'isola Pinta. L'intervento, realizzato con risorse umane insufficienti, ha dimostrato quanto sia ve-

I ratti neri (*1*), giunti alle Galápagos a bordo di navi nel lontano XVII secolo, divorano le uova deposte da rettili e uccelli nativi. Per contrastarli, i biologi hanno distribuito esche ratticide nelle zone di nidificazione del petrello delle Galápagos (*2*) e di altre specie.

ro il detto diffuso tra chi si occupa di eradicazione: un successo al 99 per cento è un fallimento al 100 per cento. Al termine della campagna erano rimaste sull'isola solo dieci capre, come ricorda Victor Carrion, ex ufficiale dello statunitense National Park Service, che ha partecipato a molti progetti del genere. Nell'arco di dieci anni il numero era risalito a 2000. «Il problema – confessa Carrion alzando le spalle – era la fase finale».

Il Galápagos National Park Service ha iniziato a sviluppare piani di eliminazione più efficaci alla fine degli anni novanta. Più o meno a quell'epoca, un Campbell ventiduenne, ancora indeciso su che cosa fare della sua vita, è arrivato sull'arcipelago. Non aveva alcun interesse particolare per visitare le Galápagos, se non forse una vecchia passione per gli uccelli che da adolescente, a Brisbane, teneva a centinaia in voliere da lui costruite. Nell'agosto 1997 ha partecipato come volontario a un progetto di eliminazione delle capre sull'isola Isabela. Un decennio dopo sarebbe stato alla guida di alcuni dei più ambiziosi — e controversi — progetti di eliminazione insulare al mondo.

Il diavolo conosciuto

L'eliminazione è una pratica spietata, un termine eufemistico. Nel 2004 il National Park Service e la Charles Darwin Foundation hanno avviato una campagna più sistematica per eliminare le capre dall'area settentrionale e disabitata di Isabela, la più grande delle isole dell'arcipelago. Sono stati usati due elicotteri per la caccia aerea: due o tre cacciatori a bordo di ciascun elicottero sparavano alle capre dal cielo con fucili calibro 12 e carabine AR15 semiautomatiche calibro .223. Dopo la prima battuta aerea, altri cacciatori a terra affiancati da cani addestrati si sono addentrati nelle zone coperte da fitta vegetazione per fare uscire allo scoperto le capre sopravvissute. Nell'ultima fase, a inizio marzo 2005, la squadra di eliminazione ha dispiegato ben 700 «capre Mata Hari» e «capre Giuda».

Il progetto di PhD di Campbell consisteva proprio nello sviluppo della capra Mata Hari, una variante della capra Giuda, risalente agli anni ottanta. Le capre Giuda sono dotate di un collare radiotelemetrico. Poiché questi animali sono molto gregari, i cacciatori installano «cimici», per così dire, sulle capre per stanare altri esemplari. Con le capre Mata Hari la mossa è ancora più audace: si tratta infatti di capre femmine con impianti ormonali che provocano uno stato di estro permanente, in modo da indurle a cercare e attrarre i maschi. Inutile dirlo, le capre Mata Hari non sono nate nel crogiuolo evolutivo delle Galápagos.

Campbell ha insegnato ai cacciatori indigeni a operare le capre femmine sul campo, a legare le tube di Falloppio, porre fine a eventuali gravidanze, inserire pacchetti ormonali affinché fossero sempre in calore e infine installare trasmettitori radiotelemetrici sui collari per poterle localizzare. Una volta liberate, le capre Giuda e Mata Hari scovavano gli ultimi esemplari sopravvissuti. Nel complesso, Project Isabela ha eliminato 62.818 capre, con una spesa di circa 4,1 milioni di dollari. Stando a quanto riferito da Carrion, il reclamo più ricorrente da parte dei residenti è stato non avere ricevuto neanche un po' di carne. «Dicevano: "Abbiamo fame, il cibo ci serve!"», ricorda. Nemmeno un successo al 100 per cento, come in questo caso, è stato sufficiente: secondo Carrion sono stati almeno nove i casi in cui residenti insoddisfatti hanno deliberatamente reintrodotto le specie eradicate, talvolta anche come forma di protesta contro i regolamenti locali sulla pesca.

La portata delle campagne di eliminazione nelle Galápagos è impressionante: 79.579 capre «rimosse» da Santiago, 41.683 da Pinta, 7726 da San Cristóbal. In totale sono state «rimosse» 201.285 capre da 13 isole (e quando si usano eufemismi come «rimuovere» al posto di «uccidere», significa che si tratta di pratiche orribili). È una fortuna che i turisti che si riversano alle Galápagos per nuotare con le tartarughe marine e seguire le graziose evoluzioni dei suoi leggendari uccelli non sappiano che negli ultimi

vent'anni le isole si sono trasformate in un luogo di sterminio per preservare la loro famosa biodiversità.

Basta un progetto di eliminazione di roditori di modesta entità per capire quanto possano essere insidiosi i sistemi tradizionali. Nel 2012 il Galápagos National Park Service e i suoi collaboratori hanno iniziato a impiegare un rodenticida, il brodifacoum, sulla piccola isola disabitata di Pinzón, per eliminare i ratti che da decenni depredavano le uova e i piccoli delle tartarughe giganti. L'intervento è stato efficace, e per la prima volta in un secolo sull'isola è stata rilevata la presenza di un numero consistente di piccoli di tartaruga. Il veleno però è stato assimilato anche dalle tropidure, che a loro volta sono state mangiate dalle poiane delle Galápagos, una specie a rischio, con un totale di almeno 22 decessi per avvelenamento da brodifacoum (anche se molte poiane erano rimaste «in cattività» per due settimane). I ricercatori hanno rilevato un livello elevato di ratticida nella carcassa di una civetta più di due anni dopo la distribuzione delle esche.

E questo ci riporta al più ambizioso piano di eliminazione insulare delle Galápagos, e forse di tutto il mondo: un'impresa che a Floreana chiamano semplicemente il *Proyecto*, il progetto.

Il diavolo nascosto nei dettagli

A Floreana c'è un solo negozio, e una sola strada principale. Le case, come nel resto dell'arcipelago, sono costruzioni semplici realizzate con blocchi di cemento e tetti di lamiera ondulata. Se si vuole andare in uno dei pochi ristoranti dell'unico paese dell'isola è bene avvisare in anticipo, altrimenti non ci sarà abbastanza da mangiare. I residenti parlano con tono pacato, sono generosi e affabili e hanno saldi principi. Diversi anni fa, quando un imprenditore di un'altra isola non ha pagato i suoi dipendenti locali, tutti gli abitanti di Floreana si sono rifiutati di servirgli da mangiare, affittargli una stanza e perfino di parlargli, facendo così fallire il suo progetto. Le bizzarre politiche dell'isola e il forte senso di indipendenza trasformano una simile impresa in una vera e propria sfida dal punto di vista sociale. Come dice Campbell: «Basta un attimo per complicare tutto».

La spesa prevista per l'eliminazione di ratti e topi è di 20 milioni di dollari, e aumenta di un milione per ogni anno di ritardo

Un mantra ricorrente nel rapporto delle National Academies sul gene drive, e in quasi tutti i documenti ufficiali sull'ingegneria genetica degli ultimi quarant'anni, è la necessità di un «coinvolgimento del pubblico». Ma questa espressione asettica non coglie la passione e la complessità dei progetti reali in circostanze reali. Se in generale gli interventi di eliminazione sono difficili, quelli sulle isole abitate sono *veramente* difficili. Campbell se ne è reso conto anni fa, in un'assemblea con membri della comunità di Floreana per discutere il Proyecto. Un residente, fermamente contrario all'idea di allontanare il bestiame dall'isola, ha guardato negli occhi Campbell e gli ha detto, con un linguaggio non replicabile su queste pagine: «Se lo fai, ti ammazzo». Campbell ricorda che fu un momento «decisamente conflittuale».

L'intensità di queste emozioni non sembra fuori luogo, considerando la portata dei possibili disagi. Nel 2012 le autorità delle Galápagos, insieme a Island Conservation, hanno iniziato a formulare quello che considerano il più complesso piano di eliminazione su un'isola abitata mai elaborato. A complicarlo non sono solo gli adulti agguerriti di Floreana. Sono anche i bambini, gli animali domestici e il bestiame, oltre agli uccelli e alle tropidure a rischio di estinzione.

Consideriamo gli enormi rischi ambientali di un intervento di eliminazione «tradizionale», non genetico. Per eliminare tutti i ratti e i topi da Floreana, il progetto prevede il lancio dall'elicottero di 360 milioni di pellet da un grammo di brodifacoum. «In pratica, si ricoprirebbe l'intera isola», sintetizza Campbell. E non una volta sola, ma due in pianura e tre sui rilievi, nell'arco di due mesi. Per ridurre al minimo i potenziali rischi per la salute e l'ambiente, il piano richiede precauzioni eccezionali. Le risorse idriche dovranno essere protette. È possibile che i bambini debbano lasciare l'isola anche per sei settimane. Gli animali domestici dovranno essere allontanati o rimanere rinchiusi in casa o in gabbia. I grandi allevamenti di bestiame – come bovini, maiali e cavalli – dovranno essere chiusi nei recinti (dopo che gli agricoltori hanno messo bene in chiaro che allontanarli dall'isola per sei mesi è fuori discussione). Le galline dovranno restare in nuovi pollai chiusi, costruiti appositamente per il progetto. Le tartarughe giganti delle Galápagos ospitate nel ricovero Asilo de la Paz dovranno restare temporaneamente confinate. Gli uccelli a rischio saranno catturati e trattenuti in apposite voliere durante il lancio delle esche.

Nei luoghi non raggiungibili dall'alto, come gli edifici, le case o altre strutture, il gruppo di eliminazione distribuirà trappole e contenitori per esche (sarà necessario registrare la posizione di ciascun contenitore in ogni casa, e Carolina Torres, avvocato di Island Conservation, sta formulando un accordo scritto per ogni abitazione). «Basta un'unica femmina incinta, un'unica area non trattata, per decretare il fallimento», dice Campbell. «Bisogna entrare in ogni edificio, in ogni casa, in ogni intercapedine, in ogni ripostiglio, sotto ogni frigorifero, per catturare fino all'ultimo topo».

I collaboratori di Island Conservation hanno rivoluzionato l'idea di «coinvolgimento del pubblico». In un suo viaggio recente, Torres ha portato in regalo cioccolatini a Ericka Wittmer, matriarca di una delle più antiche famiglie dell'isola, e ha incontrato numerosi agricoltori per spiegare loro una questione legale relativa ai contratti di lavoro su parcelle di terreno. Poco tempo fa l'organizzazione ha fornito a famiglie locali la vernice necessaria per migliorare l'aspetto delle loro case di cemento. A una residente che aveva espresso il desiderio di aprire un ristorante, Campbell e Torres hanno dato il loro sostegno e promesso di diventare clienti. L'organizzazione ha reclutato architetti per progettare nuovi pollai per gli allevatori dell'isola; ogni unità costerà circa 22.000 dollari. Campbell ha imparato a sue spese che costruire rapporti diretti, unoa-uno, è il modo migliore per coinvolgere le persone nelle decisioni su un progetto così delicato. «Se convochi un'assemblea in municipio, per dire, ti massacrano», spiega. «Due o tre persone dominano il dibattito, tu non sai che cosa pensano gli altri e poi ti tocca perdere un sacco di tempo a gestire la disinformazione».

Campbell spiega che, nonostante le riserve iniziali, la maggior parte dei residenti di Floreana è favorevole al piano di eliminazione. Sulle colline, in mezzo a un campo di aranci, piante di ananas e altre coltivazioni, incontriamo un agricoltore, Holger Vera, che si lamenta della voracità dei roditori locali. Dice che mangiano i germogli del granturco, divorano gli ananas, scavano e mangiano i tuberi della manioca. «Ormai mangiano perfino la canna da zucchero», aggiunge. «Mangiano tutto. Se però riusciamo a liberarcene, possiamo coltivare qualsiasi cosa». Torres spiega che, dopo lo scetticismo iniziale, ora Vera è entusiasta del Proyecto. Anche se

In passato si riteneva che le tartarughe giganti di Floreana si fossero estinte, ma recenti ricerche genetiche hanno identificato specie imparentate sulla vicina isola Isabela. I biologi stanno incrociando le tartarughe e le stanno reintroducendo a Floreana.

dovrà tenere rinchiusi i suoi sette cani? «Sì, sì», risponde lui. Anche Cruz — proprietario di 80 mucche, 130 maiali, più di 200 polli, dieci cavalli e due cani — è d'accordo con il progetto e con la modalità con cui è stato discusso insieme ai residenti di Floreana. «Ci sentiamo sempre al corrente di quello che succede», dice.

«In sostanza abbiamo raccolto adesioni verbali» da quasi tutti i residenti, spiega Campbell. Il piano deve ancora ricevere l'approvazione definitiva dalle autorità delle Galápagos. È convinto che il progetto avrebbe potuto essere avviato nel 2017 se i finanziamenti fossero stati garantiti per tempo. La spesa complessiva prevista è di 20 milioni di dollari, ma i ritardi nei finanziamenti hanno costretto a posticipare il suo inizio almeno fino al 2020; Campbell stima che i costi aumenteranno di un milione di dollari per ogni anno di ritardo. Nonostante le incertezze economiche, il Proyecto ha dato prova della sua concretezza a metà luglio 2017, quando sette container di 6 metri sono sbarcati a Floreana. Serviranno per immagazzinare mangimi incontaminati per il bestiame, o foraggio, da usare durante la fase di eliminazione dei roditori; alcuni agricoltori hanno già iniziato a riempirli.

Realizzare un progetto così complesso è come gestire un ecosistema burocratico: bisogna bilanciare l'aspetto normativo, il coinvolgimento della comunità, la logistica, i finanziamenti, il contenimento dei rischi derivanti dal veleno. Per questo Campbell pensa che il progetto di Floreana stia «spingendo al limite» le potenzialità degli strumenti tradizionali di eliminazione. Ed è per questo che non di rado ripete: «Se usassimo la tecnologia del gene drive, le conversazioni sarebbero più semplici, e le risposte molto più pragmatiche».

Il diavolo sconosciuto

Campbell si è interessato per la prima volta alle potenzialità dei gene drive nel 2011, quando ha partecipato a una teleconferenza tra biologi della North Carolina State University (NCSU) e autorità del Fish and Wildlife Service degli Stati Uniti, per discutere di una possibile soluzione genetica all'invasione di topi ormai fuori controllo nella Southeast Farallon Island, circa 30 chilometri a ovest delle coste della California, vicino a San Francisco. John Godwin, neurobiologo della NCSU specializzato in comportamento animale, era venuto a conoscenza dei problemi di quest'isola delle Farallon nel 2011, durante una ricerca su Internet. Casualmente la sua università ospitava una rinomata struttura dedicata alla sperimentazione sulla manipolazione genetica e all'analisi delle sue implicazioni etiche. Due suoi colleghi, Fred Gould e David Threadgill, stavano già studiando la possibilità di alterare il genoma del topo allo scopo di ottenere esemplari incapaci di generare figlie femmine. Altri due colleghi, Jennifer Kuzma e Jason Delborne, si sono dati molto da fare per capire come convincere tutte le parti in causa – agenzie governative, enti preposti alla gestione degli animali, specialisti di bioetica e, naturalmente, il grande pubblico – a considerare l'eventualità di liberare nell'ambiente animali geneticamente alterati. Kuzma e Gould sono condirettori del Genetic Engineering and Society Center della NCSU.

Per farla breve, nel 2016 Island Conservation e alcune altre organizzazioni internazionali hanno unito le forze per lanciare il progetto GBIRd – Genetic Biocontrol of Invasive Rodents, «biocontrollo genetico dei roditori invasivi». L'avvento della tecnica di editing genomico CRISPR ha incentivato le ricerche sullo sviluppo di un approccio alternativo all'eliminazione. Questi studi hanno subito una forte accelerazione nel luglio 2017, quando la statunitense Defense Advanced Research Projects Agency ha offerto 3,2 milioni di dollari al gruppo della NCSU per individuare gene drive utili per l'eliminazione dei topi dagli ambienti insulari.

Il principio alla base dei drive genetici è controintuitivo per chiunque sia cresciuto con gli insegnamenti di Gregor Mendel e delle sue piante di pisello e con la nozione di ereditarietà casuale dei geni dei genitori. Di norma le probabilità di ereditare un gene da un genitore piuttosto che dall'altro sono 50-50. In alcuni rari casi, però, alcuni geni sono favoriti, o «egoisti»: sono ereditati con una frequenza molto più alta di quanto il caso non lascerebbe presupporre. Uno di questi geni (tecnicamente, una regione del

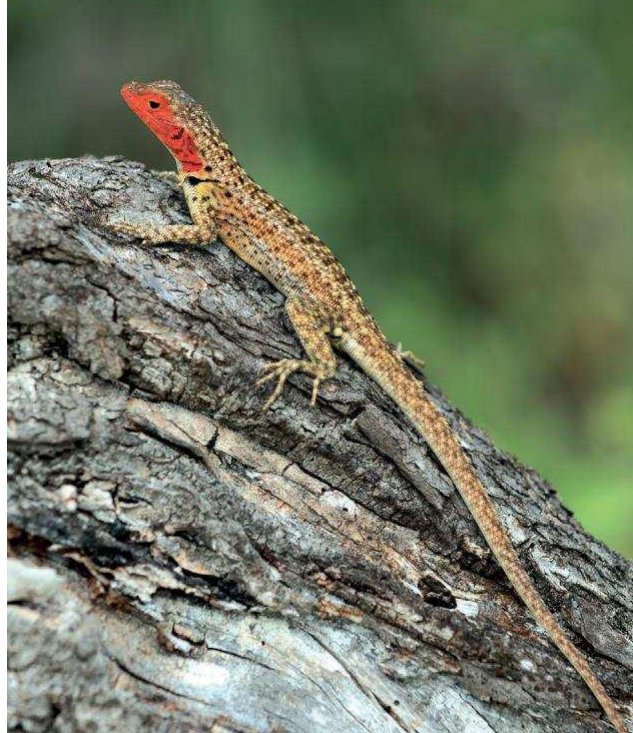
Tui De Roy

genoma) si trova sul cromosoma 17 dei topi: è chiamato «complesso-T», ed è ereditato con una frequenza del 95 per cento. In teoria potrebbe essere usato come cavallo di Troia per introdurre rapidamente un secondo gene in una popolazione.

In un contesto di eliminazione, i ricercatori in teoria potrebbero aggiungere un secondo gene al complesso-T e in questo modo «spingere» quel secondo tratto nella maggioranza della progenie. Uno di questi geni di topo, chiamato *SRY*, determina il genere maschile: legandolo a un gene egoista si otterrebbero sempre più maschi (e sempre meno femmine) in ogni generazione, fino a ottenere una popolazione di topi senza figlie. Una delle prerogative indispensabili per applicare il gene drive è che il periodo di tempo tra una generazione e la successiva nella specie obiettivo sia breve: i topi soddisfano questo requisito, perché tra nascita e maturità riproduttiva passano solo dieci settimane. Se i topi potessero essere manipolati in laboratorio per trasmettere un determinato gene, per esempio per produrre un unico genere sessuale, e se questi topi si riproducessero con successo in natura, quel gene potrebbe essere rapidamente introdotto in una popolazione.

I «se» non sono pochi, ma Threadgill, attualmente alla Texas A&M University, punta a questa strategia con i topi. Questa cosiddetta «razza senza figlie» potrebbe eliminare una popolazione di topi senza bisogno di distribuire veleno nell'ambiente né trasferire gli altri animali oltremare, e senza tutti gli incubi logistici insiti nel progetto di Floreana. Paul Thomas, biologo dell'Università di Adelaide, in Australia, sta studiando l'impiego di CRISPR per disattivare geni legati alla fertilità femminile nei topi: una tecnica che potrebbe essere adottata per generare una popolazione di femmine sterili. E Godwin, il neurobiologo, sta effettuando esperimenti per stabilire se un topo ingegnerizzato può essere accettato come partner sessuale dai topi selvatici (attualmente sta lavorando con topi prelevati da Southeast Farallon).

L'eliminazione delle specie non è l'unica applicazione del gene drive. Target Malaria è un progetto che mira a ingegnerizzare le zanzare in modo da renderle incapaci di trasmettere la malaria (*si veda l'articolo a p. 28*); l'organizzazione, finanziata dalla Bill & Melinda Gates Foundation, ha già avviato in Africa un'attività di assistenza e sensibilizzazione in previsione di un esperimento sul campo. Kevin Esvelt, biologo del Massachusetts Institute of Technology, sta seguendo un progetto per ingegnerizzare i topi dalle zampe bianche dell'isola di Nantucket al fine di renderli immuni ai batteri che provocano la malattia di Lyme. Nel mondo dei gene drive è risaputo che le isole sono il posto migliore per effettuare test sul campo, soprattutto se piccole e disabitate. Campbell ritiene che il primo esperimento sul campo del gene drive sarà eseguito sulle zanzare, e aggiunge che i luoghi più adatti a ospitarlo saranno probabilmente gli Stati Uniti, l'Australia o la Nuova Zelanda, perché i loro enti di controllo sono abbastanza sofisticati da poter gestire nuove tecnologie genetiche controverse.

Gli interventi di eliminazione sono dibattuti (*si veda il box a p. 34*), e la modifica genetica lo è ancora di più. «Non esiste un modo sicuro per sperimentare queste tecnologie in natura», sostiene Dana Perls, responsabile delle campagne sugli alimenti e sulle tecnologie di Friends of the Earth. Nel settembre 2017 Jane Goodall, Fritjof Capra e altri conservazionisti hanno pubblicato una lettera aperta per chiedere una moratoria sulla ricerca. I firmatari hanno lanciato un monito a Island Conservation, dichiarando di essere «preoccupati del fatto che alcune organizzazioni conservazioniste abbiano accettato finanziamenti per rilasciare nell'ambiente organismi modificati con gene drive».

Il grande timore sono le «conseguenze impreviste»: la paura che possa verificarsi qualcosa di inatteso e negativo. È innegabile che la tecnologia del gene drive «possa avere effetti nocivi su altre specie o ecosistemi», come dichiarato dalle National Academies, e questo basta per imporre cautela e prudenza. Ma è anche vero che in passato, nel corso di altri dibattiti pubblici come quello sul DNA ricombinante degli anni settanta, è stato spesso difficile distinguere tra preoccupazioni legittime e timori esagerati.

Tornando al mondo reale, durante un'escursione sui rilievi di Floreana, Campbell e Torres mi hanno condotto a una sorgente di acqua dolce, non lontana dalla grotta in cui si dice abbia dormito il primo abitante dell'isola, Watkins l'ubriacone, per riprendersi dalle sue sbronze. Il progetto prevede che tutta la zona circostante, già recintata, sia coperta con un tendone e che le tubature siano dotate di filtri speciali per garantire che nessuna esca rodenticida entri nel sistema, anche se in realtà il brodifacoum non è idrosolubile. Una parte dell'impegno civile, spiega Campbell, consiste nel gestire le impressioni del pubblico, oltre alle paure legittime. «Abbiamo a che fare con la percezione che le persone hanno degli agenti tossici», spiega. «Cambiare le percezioni è difficile, perché non cambiano». Ecco un'altra ragione per cui, secondo lui, l'approccio genetico è più invitante. Poi all'improvviso Campbell ha cambiato discorso.

«Ecco», ha detto tutto d'un tratto, puntando il dito verso un fruscio tra le piante all'interno della rete di recinzione. «Lo vedi? È un ratto!».

Per un istante, tra le foglie hanno fatto capolino due occhi scuri e brillanti. Campbell l'ha identificato come *Rattus rattus*, o ratto nero, che notoriamente si ciba delle uova e dei piccoli di petrello delle Galápagos e di tartaruga gigante. Come tutti i ratti, è sparito in un istante: un campanello d'allarme della presenza di una popolazione sicuramente vasta, una grossa minaccia per quelle che Campbell chiama «specie sull'orlo del baratro».

L'abilità o la potenza dello straniero

Ogni passeggiata alle Galápagos diventa un'escursione nella natura, e ogni essere vivente racconta una storia di conservazione: qualcuna a lieto fine, qualcun'altra no. Durante il nostro ultimo giorno a Floreana, alcune di queste storie le ho sentite rac-

Tui De Roy

Le tropidure di Floreana (*a fronte*) sono facili prede per i gatti selvatici che assediano l'isola.

contare da Campbell, quando il suo occhio acuto si posava su uno degli animali che rendono questo paesaggio così amato e allo stesso tempo tormentato.

A colazione, un fringuello dei cactus non voleva allontanarsi dal nostro tavolo. Campbell ha spiegato che nel corso dell'evoluzione il suo robusto becco di colore nero e giallo si è ingrandito e rinforzato per rompere i semi particolarmente grossi e duri di *Opuntia*, un cactus endemico di Floreana; il cactus, a sua volta, sta evolvendo semi ancora più grandi e resistenti per contrastare questa abitudine. Questo ci ricorda che l'evoluzione non è un concetto statico, ma un processo continuo. Campbell ha visto poi un topo che schizzava via dietro un blocco di lava. Mentre finivamo di mangiare ha fatto la sua comparsa un altro appartenente a una specie invasiva: un nerissimo ani beccoliscio. Classico esempio di «conseguenze impreviste» alla vecchia maniera, l'ani è stato introdotto nelle isole Galápagos dagli agricoltori negli anni sessanta, nella speranza che riuscisse a tenere sotto controllo i parassiti che affliggevano il bestiame. L'uccello tuttavia non si è dimostrato all'altezza delle aspettative, per così dire, ma il numero di esemplari è cresciuto a dismisura e la specie è ormai considerata invasiva.

Più tardi, mentre camminavamo verso la spiaggia La Lobería, Campbell ha indicato sulla sabbia le impronte fresche di gatti inselvatichiti che divorano i giovani esemplari di iguana marina e di tropidura. («I più piccoli non hanno possibilità di scampo», ha detto.) In fondo alla spiaggia Campbell ha fatto un cenno verso il ramo rosicchiato di un cactus *Opuntia*. Ha spiegato che dopo i morsi dei roditori la pianta non riesce a fiorire o a dare frutti, privando così tartarughe e tordi beffeggiatori di una fondamentale fonte di sussistenza, soprattutto nella stagione secca, e sottraendo siti di nidificazione ai fringuelli. In seguito ci siamo fermati ad ammirare alcune magnifiche tartarughe marine rimaste intrappolate in una laguna durante la bassa marea. Anche le loro uova e i loro piccoli sono bocconi prelibati per ratti e gatti.

È stato Richard Dawkins, il «cane da guardia» di Darwin del XX secolo, a citare il verso del poeta Alfred Tennyson «La natura, rossa di zanne e d'artigli» per descrivere il lato cruento della selezione naturale: la natura a volte gioca sporco, e l'ecosistema da cartolina di luoghi come le Galápagos spesso nasconde un lato più cupo, un'interazione meno sentimentale tra predatore e preda, il cui delicato equilibrio viene ripetutamente turbato dagli esseri umani sia introducendo specie invasive sia cercando di espiare a queste iniziative mal concepite con rimedi letteralmente tossici. E ora, a breve, potremmo trovarci costretti a decidere se usare o meno tecniche futuristiche di modifica genetica per riportare l'isola a uno stadio precedente, più autentico.

A onor del vero, un breve sondaggio tra gli abitanti di Floreana non ha rilevato una grande preoccupazione per le potenziali applicazioni del gene drive, anche se è difficile stabilire quale sia il grado di comprensione di questa tecnologia (e dei loro potenziali rischi). Vera ha respinto ogni timore e ha dichiarato che accetterebbe di buon grado una soluzione genetica al problema dei roditori. Invece Ingrid Wittmer, altra discendente di una delle più antiche famiglie di Floreana, ha scosso la testa in segno di disapprovazione, dicendosi piuttosto preoccupata per le sorti del gufo di palude nel caso in cui il Proyecto elimini la principale fonte di nutrimento di questo animale: i topi. Cruz, il cui padre è arrivato sull'isola nel 1939, quando gli abitanti erano solo 11, ha espresso il suo punto di vista da agricoltore sull'ipotesi dei topi senza figlie: «È come l'inseminazione artificiale del bestiame», ha spiegato. «Se vuoi le femmine, allora usi il seme per le femmine. È la stessa cosa».

«Per quanto mi riguarda, questi problemi li abbiamo creati noi, e se ce ne stiamo seduti senza fare niente le conseguenze saranno gravi», ha detto Campbell. «Sappiamo che cosa ci aspetta. *Non* fare proprio niente è... semplicemente irresponsabile. Se hai gli strumenti, e non li usi, allora *sei* colpevole».

Gli strumenti non li abbiamo ancora. Ma se l'abilità della biologia molecolare riuscirà mai a combinarsi con la potenza del gene drive, e se verrà usata per gestire le specie invasive delle Galápagos o di qualsiasi altra isola, bisognerà ricordare che quasi tutte le catastrofi ecologiche verificatesi nel laboratorio evolutivo vivente del pianeta sono arrivate per mano dell'essere umano. Le capre, gli asini, i ratti, i gatti, i maiali, i muli e perfino i gattopardi — seppur per breve tempo — sono stati portati dall'essere umano, sulle sue navi, con la sua mediazione.

Con un'osservazione sarcastica che riecheggia ancora quasi due secoli dopo, Darwin annotò sul suo diario che mentre gli uccelli in Inghilterra avevano sviluppato una ben motivata diffidenza verso gli esseri umani, quelli delle Galápagos «non hanno acquisito questo sano timore». Di seguito aggiunse alcune parole che oggi potrebbero servire da monito per il mondo scientifico del XXI secolo, in particolare a proposito del gene drive. «Possiamo quindi dedurre da questi fatti – scrisse Darwin, riferendosi alla mancanza di paura negli uccelli – quale scompiglio debba causare in una regione l'introduzione di un qualsiasi nuovo predatore, prima che gli istinti dei suoi abitanti indigeni si adattino all'abilità o alla potenza dello straniero». ■

PER APPROFONDIRE

Current Status of Alien Vertebrates in the Galápagos Islands: Invasion History, Distribution, and Potential Impacts. Phillips R.B. e altri, in «Biological Invasions», Vol. 14, n. 2, pp. 461-480, febbraio 2012.

Regulating Gene Drives. Oye K.A. e altri, in «Science», Vol. 345, pp. 626-628, 8 agosto 2014.

Gene Drives on the Horizon: Advancing Science, Navigating Uncertainty, and Aligning Research with Public Values. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, National Academies Press, 2016.

CRISPR in agricoltura. Hall S., in «Le Scienze» n. 572, aprile 2016.

Plutone mostra una vasta gamma di colori e strutture di superficie in questa immagine a colori accentuati ripresa nel 2015 da New Horizons.

La sonda New Horizons della NASA ha rivoluzionato le nostre conoscenze su questo corpo celeste lontano

Plutone svelato

di S. Alan Stern

IN BREVE

Dopo un periodo lungo e accidentato affinché la missione diventasse realtà, nel 2006 è stata lanciata la sonda New Horizons per esplorare da vicino il sistema di Plutone.

Nel corso di un sorvolo del pianeta nell'estate 2015 la sonda ha scoperto che Plutone e i suoi satelliti sono più complessi e dinamici del previsto.

Lungi dall'essere un oggetto statico e indifferenziato, Plutone ha mostrato montagne imponenti, vasti ghiacciai e un'atmosfera ricca. E New Horizons ha scoperto caratteristiche stupefacenti, come canyon e una calotta polare rossa, addirittura sulle lune di Plutone. I ricercatori stanno ancora analizzando l'enorme quantità di dati inviata dalla sonda e prevedono altre scoperte.

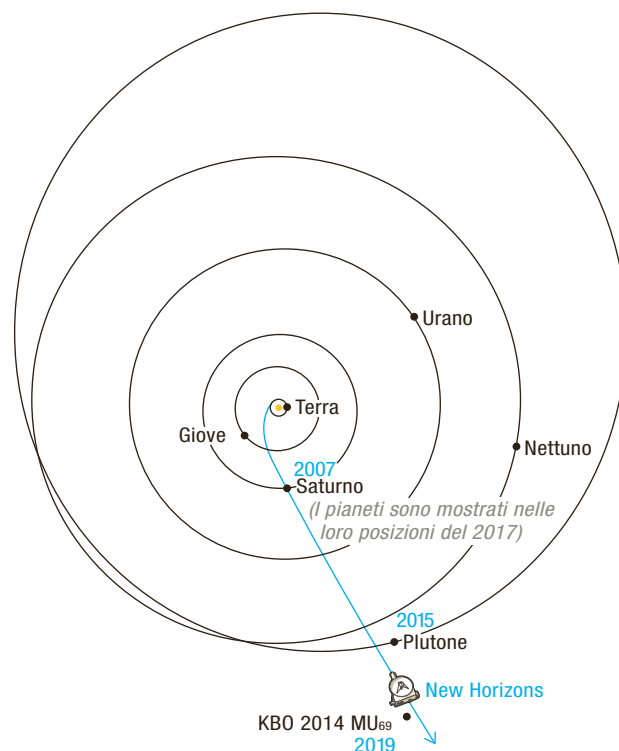
Il 14 luglio 2015, verso le 21.00, ero con Charles Bolden, amministratore della NASA, e altri colleghi nel nostro controllo missione presso il laboratorio di fisica applicata della Johns Hopkins University, in Maryland. Di lì a un minuto avremmo dovuto ricevere i primi segnali della sonda New Horizons, a quasi 5 miliardi di chilometri di distanza, dopo che aveva compiuto un ardito passaggio ravvicinato presso Plutone e il suo sistema di cinque lune.

Quel segnale, che correva alla velocità della luce verso le gigantesche antenne della NASA sulla Terra, avrebbe comunicato se il sorvolo era andato a buon fine. La nostra missione era stata un fiasco o un successo? O ci sarebbe stato silenzio? Tutto era possibile.

Nelle vicinanze c'erano anche quasi 2000 invitati in attesa di notizie, come innumerevoli altre persone in tutto il mondo, per televisione e Internet. C'erano voluti più di 26 anni per arrivare a questo punto: 14 anni per «vendere» il progetto, quattro per costruirlo e lanciarlo, e poi più di nove anni per attraversare il sistema solare. Per me, il capo del progetto, e per le nostre squadre operative e scientifiche, tutto ciò per cui avevamo lavorato dipendeva da quello che stavamo per apprendere dal segnale in entrata.

Improvvisamente arrivarono le comunicazioni. Pochi secondi più tardi, sugli enormi schermi del controllo missione cominciava ad apparirne la decodifica: un rapporto sullo stato di salute della sonda. Uno per uno i nostri ingegneri di volo valutarono i rispettivi dati e fecero rapporto, ognuno confermando che i sistemi della sonda erano efficienti. New Horizons era sopravvissuta allo storico sorvolo e funzionava. Nel controllo missione ci fu un'esplosione di urrà e abbracci. La nostra impresa quasi trentennale per raggiungere il mondo più lontano mai studiato da vicino, l'Everest dell'esplorazione planetaria, aveva avuto successo!

La mattina dopo New Horizons aveva già inviato alla Terra le prime immagini ad alta risoluzione, rivelando la stupefacente complessità di Plutone. Nel corso dei giorni e mesi successivi continuarono ad arrivare dati dalla sonda, e la cosa andò avanti fino a fine 2016. Complessivamente New Horizons ha svolto più di 400 diverse osservazioni, usando sette strumenti scientifici: un materiale che comprende circa 5000 volte i dati inviati dalla prima missione su Marte della NASA, Mariner 4.

La ricchezza scientifica di questi dati ha rivoluzionato la nostra conoscenza del sistema di Plutone e ha ribaltato le opinioni comuni sul dinamismo e la complessità dei piccoli pianeti. E anche la reazione pubblica alla missione – che comprende più di 2 miliardi di visite al sito web della missione, quasi 500 articoli in prima pagina nella settimana del sorvolo e decine di servizi su riviste, il *doodle* di Google e altro ancora – è stata una piacevole sorpresa.

A ripensarci adesso, è facile vedere quanto sia stata preziosa l'esplorazione di Plutone, sia per la ricerca sia per far apprezzare la planetologia al grande pubblico, ma in realtà la missione fu vicinissima ad arenarsi prima di partire.

2001: Odissea per lo spazio

La prima volta che la NASA annunciò concretamente l'intenzione di organizzare una missione su Plutone fu nel 1999, quando invitò gruppi di ricerca di tutti gli Stati Uniti a proporre strumenti da installare nella sua missione Pluto Kuiper Express (PKE). Dirigevo un gruppo che presentò una proposta per un insieme di strumenti formato da una telecamera principale e uno spettrometro, ma a settembre 2000 il costo stimato di PKE era cresciuto a tal punto che, prima ancora che la NASA potesse selezionare gli strumenti, l'agenzia aveva annullato la missione.

La comunità dei planetologi si mise subito in azione, condannando l'annullamento della missione e chiedendo alla NASA di tornare sui propri passi. Anche l'opinione pubblica protestò, inondando la NASA di telefonate e di più di 10.000 lettere di protesta. Un adolescente attraversò il paese per appellarsi di persona alla NASA affinché riesumasse l'esplorazione del nono pianeta. (Nonostante un diffuso malinteso, io e la maggior parte degli altri planetologi che conosco chiamiamo Plutone «pianeta», e quando parliamo o scriviamo articoli non usiamo la definizione di pianeta dell'Unione astronomica internazionale, che invece lo esclude.)

Infine, a dicembre 2000 la NASA annunciò che avrebbe bandito un concorso per nuovi progetti per una missione su Plutone. Le proposte avrebbero dovuto ancora soddisfare gli obiettivi fissati per la missione PKE e prevedere di raggiungere Plutone entro il 2020, ma avrebbero dovuto costare nel complesso circa la metà di PKE. Alla NASA giunsero cinque proposte, ciascuna spessa come un elenco telefonico, da vari gruppi di ricerca, ognuna delle quali offriva piani dettagliati per la missione. Io dirigevo una di quelle squadre, e avevamo chiamato la nostra missione New Horizons, «Nuovi orizzonti», perché proponevamo quella che sarebbe stata la prima esplorazione di un nuovo pianeta da parte della NASA dopo le missioni Voyager degli anni settanta.

Pagine precedenti: cortesia NASA, Johns Hopkins University Applied Physics Lab e Southwest Research Institute

S. Alan Stern è planetologo e vice presidente associato della divisione di scienze spaziali e ingegneria del Southwest Research Institute. È *principal investigator* della missione New Horizons ed ex direttore del Science Mission Directorate della NASA.

Il nostro gruppo, con sede al Southwest Research Institute, dove lavoro io, e il laboratorio di fisica applicata della Johns Hopkins University, dove sarebbe stata costruita e manovrata la sonda, avevano assai meno esperienza dei principali concorrenti in fatto di missioni planetarie, ma abbiamo compensato con l'ingegnosità. Per tenere sotto controllo i costi abbiamo proposto l'invio di una sonda, non due: una scelta così rischiosa che era quasi senza precedenti nella prima esplorazione di un pianeta. Abbiamo anche proposto di ibernare la sonda durante i quasi dieci anni di viaggio fino a Plutone, per ridurre i costi del personale, e di concentrarci sulle capacità scientifiche, a scapito della capacità di rispedire rapidamente i dati dopo il sorvolo. Abbiamo perfezionato la nostra proposta con innumerevoli revisioni per assicurarci che fosse impeccabile da ogni punto di vista, dalla realizzazione tecnica alla composizione della squadra scientifica, dai piani di gestione alla formazione e alla comunicazione al pubblico, fino al controllo dei costi e persino ai piani per le emergenze. A novembre 2001 la NASA annunciò di aver selezionato New Horizons. Avevamo vinto! Ma non sapevamo che cosa ci aspettava.

Per essere pronti e rispettare la nostra finestra di lancio, prevista per gennaio 2006, avremmo dovuto progettare, costruire e collaudare la nostra sonda in appena quattro anni e due mesi, un processo che missioni passate della NASA come Voyager, Galileo e Cassini avevano completato tra gli 8 e i 12 anni. E in più avevamo solo il 20 per cento del budget di Voyager. Ma mentre ci preparavamo ad affrontare queste sfide, meno di tre mesi dopo essere stati scelti, l'Amministrazione Bush propose di annullare New Horizons, eliminandola dal bilancio federale pubblicato a inizio 2002. Questa mossa scatenò una battaglia per i finanziamenti tra il Congresso e la Casa Bianca che si risolse solo quando la National Academy of Sciences valutò l'esplorazione di Plutone come una delle priorità più importanti nella *Decadal Survey* dell'estate 2002, convincendo un numero sufficiente di deputati che la missione valeva il costo. Poi, quando infine pensavamo di essere al sicuro, due chiusure, ognuna di vari mesi, del Los Alamos National Laboratory misero in forse la possibilità di acquisire plutonio a sufficienza per il generatore nucleare di energia della sonda.

In molti, sia all'interno della NASA sia nella comunità scientifica, pensavano che la squadra di New Horizons non potesse sopravvivere a tante difficoltà. Ma abbiamo lavorato letteralmente anche di notte e nei fine settimana, 52 settimane all'anno, per quattro anni, per superare questi ostacoli. E così abbiamo fatto in tempo per il lancio, pronti a volare verso Plutone.

Centrare una buca lontana al primo colpo

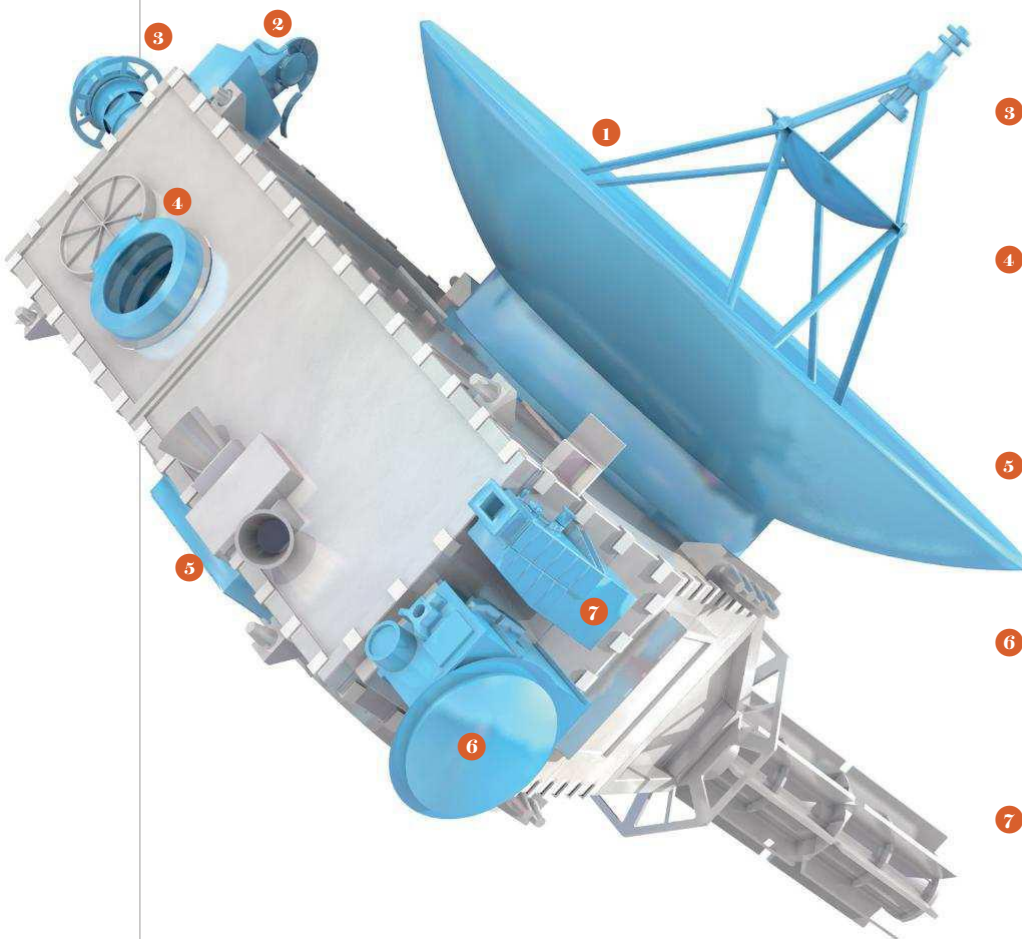
New Horizons è stata dotata di tutto ciò di cui avrebbe avuto bisogno per apprendere il più possibile nel breve passaggio ravvicinato nel sistema di Plutone. La parte fondamentale è il carico di sette strumenti, fra cui telecamere in bianco e nero e a colori, due spettrometri, che scindono la luce nelle varie lunghezze d'onda per analizzare la composizione dell'atmosfera e della superficie, e un rivelatore per studiare la polvere che finisce sulla sonda. A bordo ci sono anche due sensori di plasma spaziale, usati per misurare a che velocità l'atmosfera si allontana da Plutone e la composizione di questi gas che sfuggono, oltre a strumenti radio per misurare le temperature superficiali e descrivere la variazione di temperatura e di pressione in atmosfera in funzione dell'altitudine.

Questo carico di strumenti ha portato una potenza di fuoco scientifica mai vista in un primo sorvolo planetario, soprattutto perché abbiamo usato la tecnologia degli anni duemila, rispetto alle prime missioni allestite negli anni sessanta e settanta, come le sonde gemelle Voyager. Per esempio, lo spettrometro di Voyager 1 per mappare la composizione della superficie aveva un solo pixel, quello di New Horizons ne ha 64.000. Questi progressi tecnici, insieme alla memoria della sonda, che può contenere più di 100 volte la quantità di dati dei registratori dei Voyager, fanno sì che New Horizons sia molto più efficiente dei primi sorvoli precedenti.

Cortesia NASA, laboratorio di fisica applicata della Johns Hopkins University e Southwest Research Institute

In questa immagine di New Horizons si vede la foschia atmosferica sospesa sopra Plutone. A sinistra appaiono i monti che arrivano oltre i 4000 metri, a destra il terreno è solcato da ghiacciai. Alla sommità c'è la distesa della pianura di azoto ghiacciato chiamata Sputnik Planitia.

Una sonda ben equipaggiata

New Horizons aveva a bordo sette strumenti scientifici per ottenere più informazioni possibili su Plutone e le sue cinque lune nel corso del breve passaggio vicino al sistema. L'insieme di strumenti ha permesso di ottenere fotografie a colori e in bianco e nero, misure spettroscopiche e letture della temperatura, e di rilevare la polvere e il plasma spaziale incontrati dalla sonda.

1 REX (Radio Science Experiment)
Questo strumento usa le apparecchiature per la comunicazione radio della sonda per misurare temperatura e pressione dell'atmosfera di Plutone.

2 PEPSSI
Il Pluto Energetic Particle Spectrometer Science Investigation analizza densità e composizione degli ioni del plasma dall'atmosfera di Plutone.

3 SWAP
Lo strumento Solar Wind Around Pluto misura la velocità a cui si disperde l'atmosfera di Plutone e studia le sue interazioni con il vento solare.

4 LORRI
Il Long Range Reconnaissance Imager è una telecamera telescopica che può scattare fotografie ad alta risoluzione da grande distanza. I suoi dati hanno aiutato a mappare Plutone e a studiarne le caratteristiche geologiche.

5 SDC
Lo Student Dust Counter di polvere, uno strumento costruito e gestito da studenti, analizza la polvere spaziale che colpisce New Horizons nel corso del viaggio attraverso il sistema solare.

6 RALPH
Questa coppia telecamera-spettrometro misura le lunghezze d'onda della luce visibile e infrarossa per tracciare mappe dei colori, della composizione e della temperatura della superficie di Plutone.

7 ALICE
Alice effettua misurazioni spettroscopiche della luce ultravioletta per studiare la composizione dell'atmosfera di Plutone e cercare atmosfere intorno a Caronte e ad altri oggetti della fascia di Kuiper.

Anche se la nostra sonda era «addormentata» per gran parte del viaggio verso Plutone, la pianificazione del sorvolo ha occupato la nostra squadra per la maggior parte del viaggio. Per raggiungere gli obiettivi, New Horizons doveva arrivare entro una precisa finestra temporale di nove minuti dopo nove anni e mezzo di volo dalla Terra, e attraversare una finestra spaziale di circa 55 chilometri per 100. Potrebbe sembrare un grande bersaglio, ma colpire questa finestra da quasi 5 miliardi di chilometri di distanza è stato l'equivalente di lanciare una pallina da golf da Los Angeles a New York e centrare direttamente la buca.

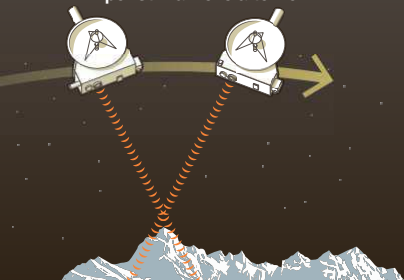
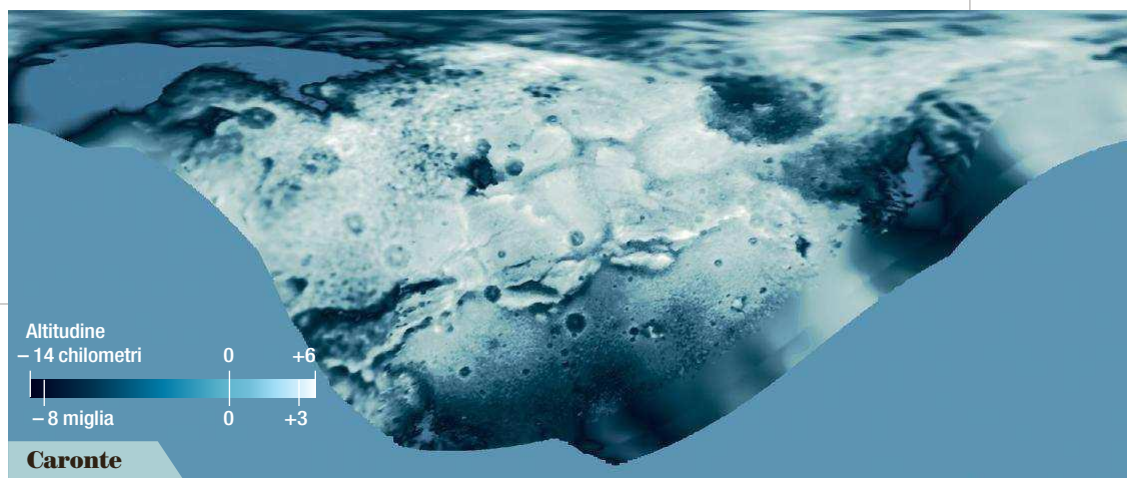
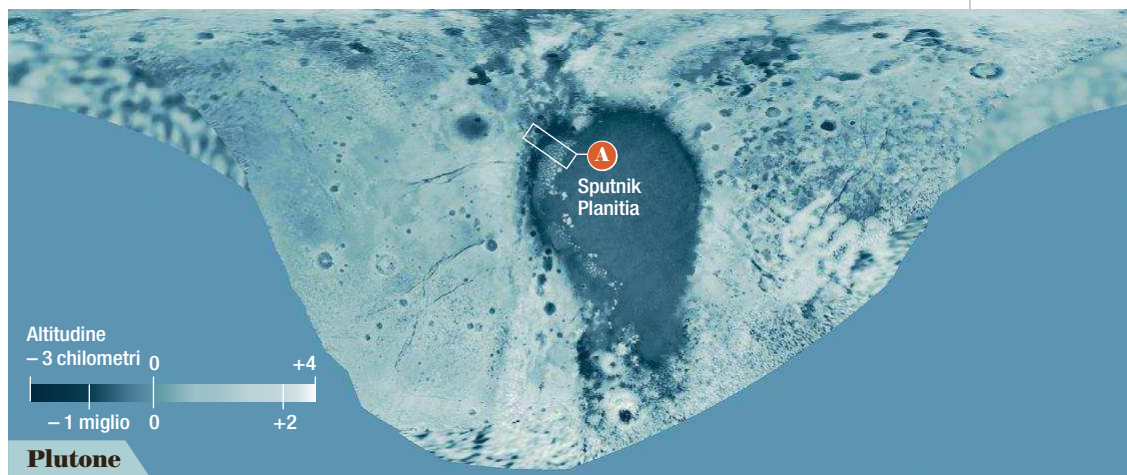
Abbiamo anche dovuto progettare, testare e programmare tutte le attività che volevamo che New Horizons effettuasse nel semestre del passaggio ravvicinato, da metà gennaio a metà luglio 2015. Tra queste attività c'erano più di 400 osservazioni di Plutone e di tutte e cinque le sue lune con ciascuno dei sette strumenti scientifici; l'analisi in fase di approccio di frammenti e altri pericoli che avrebbero potuto danneggiare la sonda; la ricerca di nuove lune e anelli; osservazioni e triangolazioni sulla posizione di Plutone per aiutarci a fare il punto; l'accensione dei motori per garantire un puntamento preciso del sorvolo; e la trasmissione di tutti i dati registrati durante l'approccio. Abbiamo anche dovuto pianificare non uno ma tre sorvoli di Plutone, ognuno con una diversa traiettoria, nel caso in cui avessimo rilevato detriti pericolosi e dovuto deviare la sonda. Infine abbiamo dovuto scrivere un programma di bordo intelligente per gestire più di 150 possibili problemi del veicolo spaziale o dei suoi strumenti e abbiamo dovuto ideare procedure di controllo della missione per decine di potenziali anomalie troppo complesse per essere affrontate dal programma della sonda.

Un nuovo pianeta

Date le piccole dimensioni e l'orbita lontana, Plutone era in gran parte sconosciuto prima di New Horizons. Anche il telescopio spaziale Hubble ne risolveva a stento il disco. Sapevamo quasi solo che il suo diametro era di circa 2200 chilometri, che aveva almeno cinque lune, un'atmosfera tenue, una superficie rossastra che con-

Territori sconosciuti

Queste carte topografiche globali di Plutone e di Caronte, realizzate con i dati stereoscopici di New Horizons, mostrano la varietà dei terreni di questi mondi. Le zone più scure, come la pianura ghiacciata centrale Sputnik Planitia di Plutone, rappresentano quote più basse; le regioni più chiare sono più elevate, come le montagne. Il terreno mancante negli angoli inferiori non era illuminato durante il sorvolo oppure non è stato risolto stereoscopicamente, quindi non sono disponibili dati. La foto in alto mostra una striscia di Plutone larga 80 chilometri in cui sono in evidenza regioni brulle e rocciose (*a sinistra*), montagne frastagliate (*al centro*) e il bordo del ghiacciaio Sputnik Planitia.

New Horizons ha potuto osservare il terreno da due angoli diversi, come fanno i nostri occhi, per misurare di quanto le cime delle montagne e altri elementi elevati si muovessero apparentemente rispetto ai terreni più bassi, e così misurare la «parallasse» delle strutture topografiche per stimarne le altezze.

Cortesia NASA, Laboratorio fisica applicata della Johns Hopkins University e Southwest Research Institute (*superficie di Plutone*); NASA, Laboratorio di fisica applicata della Johns Hopkins University, Southwest Research Institute, Lunar and Planetary Institute (*dati altitudine*)

tiene ghiaccio di metano, di azoto e di monossido di carbonio, e indizi di una calotta di ghiaccio polare e di altre strutture superficiali su larga scala. Questi fatti facevano ritenere che probabilmente era più interessante e complicato di gran parte dei mondi congelati del sistema solare esterno. Ma New Horizons ha rivelato un pianeta più complesso, geologicamente eterogeneo e attivo rispetto alle previsioni della maggior parte degli scienziati.

Tra l'altro abbiamo scoperto che l'atmosfera di Plutone arriva fino a un'altitudine di centinaia di chilometri e ha decine di strati concentrici di foschia, ma poche o niente nuvole. New Horizons ha misurato per la prima volta la pressione atmosferica alla superficie, trovando che è di appena 11 microbar, più o meno la stessa pressione della parte alta della mesosfera terrestre, circa 80 chilometri sopra di noi, alle soglie dello spazio. Abbiamo scoperto anche che l'atmosfera di Plutone sfugge da 500 a 1000 volte meno rapidamente del previsto, a una velocità molto più simile ai tassi di perdita di Marte e della Terra, rispetto a una situazione simile alle comete prevista dai modelli precedenti il sorvolo. E abbiamo scoperto che le foschie di Plutone ne colorano l'atmosfera di azzurro, conferendo ai suoi cieli un colore che ricorda quello della Terra.

New Horizons ha anche rivelato che Plutone è più grande di quanto indicassero le stime pre-sorvolo, con un diametro di 2375 chilometri. Questa misurazione indica definitivamente Plutone come il più grande dei piccoli pianeti della fascia di Kuiper. Le

sue dimensioni più grandi, combinate con la massa già nota, ne hanno abbassato la densità, il che significa che è pur sempre un mondo principalmente roccioso con un esterno ghiacciato, ma la percentuale di roccia è più vicina al 66 per cento che non al 70 per cento previsto prima del sorvolo. Della massa rimanente (non rocciosa), la maggior parte è ghiaccio d'acqua, con solo tracce di ghiacci più esotici alla superficie. I modelli dell'interno basati sulle misurazioni di dimensioni, massa e forma forniscono ora forti indizi del fatto che nasconda uno strato oceanico formato da acqua liquida, a centinaia di chilometri di profondità, dove temperature e pressioni raggiungono il punto di fusione dell'acqua.

Da anni si dibatte se la superficie di Plutone abbia forti dislivelli. La risposta dipendeva dalla profondità dello strato superiore di azoto ghiacciato. Questo ghiaccio, che costituisce la maggior parte della superficie del pianeta, è debole e sprofonda sotto il proprio peso, anche nella bassa gravità di Plutone: un suo strato spesso impedirebbe la formazione di strutture geologiche elevate. Quando New Horizons è arrivato presso Plutone, però, alcune delle prime immagini ad alta risoluzione hanno rivelato montagne torreggianti, alte fino a 4500 metri, suggerendo che l'azoto di superficie di Plutone possa essere solo un sottile strato di vernice su quella che più tardi abbiamo identificato come una crosta di acqua ghiacciata.

La varietà di caratteristiche di Plutone suggerisce che i piccoli pianeti non siano da meno di Terra e Marte quanto a complessità

New Horizons ha anche rivelato una straordinaria eterogeneità di altre strutture geologiche su Plutone. Abbiamo osservato vasti ghiacciai, sistemi di faglie che corrono per centinaia di chilometri, terreni caotici e montuosi creati dalla rottura di giganteschi blocchi di ghiaccio, scarpate di metano che si ritirano, calotte di neve di metano su alcune catene montuose e migliaia di pozzi larghi da un paio di chilometri a una decina, presumibilmente creati dalla sublimazione dell'azoto ghiacciato sulle pianure equatoriali.

Il più grande ghiacciaio di Plutone, una struttura di ghiaccio d'azoto chiamata Sputnik Planitia (in onore dello Sputnik, la prima missione spaziale), copre una superficie di circa 800.000 chilometri quadrati, quanto Italia e Spagna messe insieme: in tutto il sistema solare non si conosce niente del genere. Inoltre, pare che Sputnik Planitia sia geologicamente vivo, come rivela il ghiaccio che vi scorre, oltre alle caratteristiche che indicano che al di sotto c'è una sorgente di calore. Abbiamo anche visto segni chiari che i suoi ghiacci sono reintegrati da ghiacciai o valanghe provenienti dalle catene montuose che si stagliano tutt'attorno.

Ma le sorprese geologiche non finiscono qui. Contandone i crateri possiamo stimare quando se ne formò il suolo (più giovane è la superficie, meno tempo c'è perché si formino crateri). Così abbiamo trovato un'ampia gamma di epoche superficiali: da suolo antico e assai percosso risalente a oltre 4 miliardi di anni fa ad aree intermedie con un'età fra i 100 milioni e il miliardo di anni, fino a Sputnik, che non ha crateri identificabili e deve avere meno, forse molto meno, di 30 milioni di anni. Questa disuguaglianza di età è inaspettata, perché si riteneva che le dimensioni relativamente limitate avessero permesso a Plutone di raffreddarsi precocemente, facendogli perdere la capacità di formare nuovo suolo. Ora sappiamo che la teoria generalmente accettata era sbagliata: Plutone è geologicamente vivo, sebbene le fonti di energia che alimentano questo cambiamento non siano chiare.

E c'è dell'altro. I geologi della nostra squadra hanno scoperto torri di metano ghiacciato che arrivano a più di 300 metri, disponendosi in un sistema organizzato per centinaia di chilometri. E se tutto ciò non bastasse per un solo pianeta, abbiamo osservato anche quelli che sembrano grandi vulcani di ghiaccio risalenti ad appena 100-300 milioni anni fa, il che fa pensare che fossero attivi nel recente passato di Plutone. Alcuni del nostro gruppo di ricerca, me compreso, vedono le prove di reti di canali di drenaggio e di un lago congelato che possono indicare ere passate in cui la pressione atmosferica di Plutone era molto più elevata – persino più di quella attuale di Marte – permettendo ai liquidi di scorrere in superficie e di formare addirittura pozze.

In poche parole, la straordinaria varietà di caratteristiche atmosferiche e geologiche di Plutone ha lasciato senza parole la comunità scientifica, suggerendo che i piccoli pianeti non siano da meno della Terra e di Marte quanto a complessità.

Esplorare i satelliti di Plutone

Come Plutone, anche i suoi cinque satelliti erano largamente sconosciuti prima che New Horizons li esplorasse. Caronte, di gran lunga il più grande (con un diametro pari a quasi la metà di quello di Plutone), fu scoperto nel 1978, usando telescopi a terra, dagli astronomi planetari Jim Christy e Robert Harrington. Prima di New Horizons, si sapeva che era coperto di acqua ghiacciata inerte, che la sua atmosfera era esile o inesistente, e che era assai meno colorato e riflettente di Plutone. Le quattro lune più piccole – Stige, Notte, Cerbero e Idra – sono state scoperte tutte da membri della squadra di New Horizons grazie al telescopio spaziale Hubble, tra il 2005 e il 2012. Se ne sapeva ben poco prima del sorvolo di Plutone, tranne le loro proprietà orbitali e il fatto che avevano colori relativamente neutri, come Caronte. Persino delle loro dimensioni si avevano soltanto stime approssimative. Nessuno era mai stato risolto da un telescopio: erano semplicemente punti di luce in orbita attorno a Plutone.

New Horizons ha permesso di realizzare carte dettagliate della geologia, del colore, della composizione e dei rilievi topografici di Caronte, di cercarvi un'atmosfera in modo molto più approfondito, di misurarne la riflettività ultravioletta e di determinarne con precisione dimensioni e forma. La sonda non si è potuta avvicinare a nessuno dei quattro satelliti più piccoli quanto a Caronte, quindi abbiamo ottenuto meno informazioni. Ma, anche così, New Horizons ne ha rivelato dimensioni, periodi di rotazione e forma, e ha prodotto per ognuno una mappa grezza in bianco e nero. Nel caso di Notte e Idra, New Horizons ha prodotto anche carte a colori, misure della composizione e stime dell'età della superficie.

Grazie a queste scoperte, ora abbiamo un'idea di Caronte all'altezza delle conoscenze sui grandi satelliti ghiacciati dei pianeti giganti ottenute dalle missioni Voyager, Galileo e Cassini della NASA. Caronte non ha atmosfera né sostanze volatili in superficie, anche se abbiamo trovato formazioni di ghiaccio di ammoniaca esotica o di ammonio. In base ai conteggi dei crateri, la superficie sembra avere più di 4 miliardi di anni, con poche variazioni di età, il che significa che il suo motore geologico aveva corso per poco tempo prima di esaurirsi. In quel breve periodo, però, Caronte creò nel suo emisfero meridionale vaste pianure ghiacciate, un'ampia cintura di canyon, cinque volte più profonda del Grand Canyon, montagne e una «calotta polare» settentrionale rossa, diversa da qualsiasi altra

cosa nel sistema solare. Quel polo rosso sembra composto da metano e azoto che erano sfuggiti dall'atmosfera di Plutone nel corso del tempo e che poi si depositarono sui freddi poli di Caronte, dove la radiazione UV li ha trasformati chimicamente in sottoprodotti rossi degli idrocarburi. La cintura di canyon di Caronte sembra il risultato di sollecitazioni titaniche create dal congelamento e dall'espansione dell'acqua nell'interno di Caronte, quando si raffreddò dopo essersi formato.

La ricca struttura di Caronte, la luna più grande di Plutone, e qui sopra i festeggiamenti per il sorvolo di Plutone da parte di New Horizons al laboratorio di fisica applicata della Johns Hopkins University nel 2015.

Abbiamo scoperto che i quattro piccoli satelliti di Plutone sono riflettenti circa come il pianeta, che riflette circa il doppio di Caronte; è un mistero perché abbiano una riflettività tanto alta quando le loro superfici sembrano fatte dello stesso materiale di Caronte. Nessuno è grande abbastanza per trattenere un'atmosfera, e anche se hanno tutti crateri, che probabilmente crearono anelli temporanei attorno a Plutone quando durante la loro formazione espulsero materiale, abbiamo scoperto che oggi non ci sono anelli attorno a Plutone.

Le orbite di Notte e Idra fanno ritenere che si siano formate in seguito allo stesso impatto massiccio su Plutone che diede origine a Caronte. Le nostre carte di queste lune hanno una risoluzione sufficiente per individuare vari crateri, la cui datazione rivela che le loro superfici hanno circa 4 miliardi di anni, come Caronte. Ciò dimostra che l'impatto che li formò si verificò molto presto nella storia del sistema solare e non può essere l'attuale fonte di energia che alimenta l'attività geologica di Plutone. Abbiamo imparato anche che i periodi di rotazione delle quattro piccole lune di Plutone sono brevi a confronto con i loro periodi orbitali, un risultato sorprendente che mostra che nessuno di questi satelliti ha raggiunto quella sincronizzazione fra rotazione e rivoluzione comune per le lune dei pianeti giganti. Qualcosa, forse le trazioni gravitazionali del sistema binario di Plutone e Caronte, che orbitano l'uno attorno all'altro, influenza il moto dei satelliti.

Anche se ormai New Horizons ha trasmesso tutti i dati del suo sorvolo del sistema di Plutone, ci sono molti aspetti di queste misurazioni che abbiamo appena cominciato a esaminare. Mi aspetto numerose altre scoperte scientifiche sulla superficie, l'interno, l'origine e l'atmosfera di Plutone, nonché sulle sue lune, adesso che il nostro gruppo e altri iniziano il processo pluriennale necessario per digerire questo incredibile insieme di dati.

Prossima tappa: la fascia di Kuiper

L'esplorazione del sistema di Plutone da parte di New Horizons è completa, ma la missione continua. Nel 2016 la NASA ha approvato un'estensione di cinque anni, fino a metà del 2021, nel corso della quale la sonda esplorerà ulteriormente la fascia di Kuiper, l'ampio anello di piccoli corpi celesti e pianetini in orbita attorno al Sole oltre Nettuno. Il culmine di questa esplorazione sarà un sorvolo ravvicinato del piccolo Kuiper Belt Object (KBO) 2014 MU_{69}, il 1° gennaio 2019. Questo antico macigno rossastro conservato nel gelo cosmico, lontano dal Sole, da più di 4 miliardi di anni, sarà il resto più incontaminato della formazione del sistema solare mai esplorato. Ha un diametro di appena 30 chilometri, ma potrebbe avere proprie lune, e si ritiene che sia tipico degli oggetti da cui si formarono Plutone e altri piccoli corpi della fascia di Kuiper.

New Horizons incontrerà MU_{69} quando si troverà a una distanza dal Sole circa 44 volte maggiore di quella della Terra. La sonda studierà composizione e geologia dell'oggetto durante il passaggio ravvicinato. Cercherà indizi di attività interna e di atmosfera, di lune e anelli, e ne misurerà la temperatura.

Oltre al sorvolo di MU_{69}, tra il 2016 e il 2021 New Horizons studierà da vicino almeno un'altra ventina di oggetti della fascia di Kuiper. Queste osservazioni ci permetteranno di inserire in un contesto più ampio i nostri risultati su MU_{69} e di cercare satelliti di questi oggetti, studiarne le proprietà della superficie e determinarne la forma. New Horizons misurerà anche le proprietà dell'ambiente spaziale nelle zone più esterne della fascia di Kuiper, studiando l'elio, il vento solare e le particelle cariche in questa regione remota della sfera di influenza del Sole. Rileveremo anche la densità di polvere nella fascia di Kuiper a una distanza pari a 50 volte quella fra la Terra e il Sole, appena oltre i punti più estremi dell'orbita ellittica di Plutone.

Dopo il 2021 confidiamo che la NASA deciderà di estendere ulteriormente la missione. La sonda è sana e ha carburante ed energia per continuare a operare e comunicare con la Terra fino a metà degli anni 2030 e oltre. In questo lasso di tempo, New Horizons potrà studiare molti altri KBO e riuscirà forse anche a compiere un altro passaggio ravvicinato.

Orizzonti futuri

Dopo un periodo di sviluppo turbolento e un lungo volo attraverso il sistema solare, New Horizons ha completato la ricognizione dell'ultimo dei pianeti noti fin dall'alba dell'era spaziale ed è la prima missione che esplorerà i piccoli corpi della fascia di Kuiper. Per 15 anni, mentre progettavamo e realizzavamo la missione, ho stimolato il gruppo a usare l'esperienza e la conoscenza acquisite esplorando gli altri pianeti per prevedere ciò che avremmo trovato su Plutone. La natura ci ha sorpresi, rivelandoci un pianeta molto più diversificato e attivo di quello che ci aspettavamo.

Anzi, Plutone è così complesso e dinamico che molti di noi di New Horizons e altri nella comunità scientifica vorremmo che venisse inviata un'altra missione per esplorare ulteriormente il pianeta e le sue lune in orbita. Vorremmo anche vedere altre missioni di ricognizione come New Horizons che esplorino altri corpi della fascia di Kuiper per studiarne l'eterogeneità, come è stato fatto per i pianeti interni e i pianeti giganti. Speriamo che il successo di questa missione non sia la fine, ma anzi l'inizio dell'esplorazione dei pianeti e dei corpi più piccoli della fascia di Kuiper. ■

PER APPROFONDIRE

The Pluto System: Initial Results from Its Exploration by New Horizons. Stern S.A. e altri, in «Science», Vol. 350, articolo n. aad1815, 16 ottobre 2015.

Chasing New Horizons: Inside the First Mission to Pluto. Stern A. e Grinspoon D., Picador, 2018.

In viaggio verso il pianeta più lontano. Stern S.A., in «Le Scienze» n. 408, agosto 2002.

Gli scienziati stanno cominciando a capire se i cambiamenti della copertura nuvolosa faranno accelerare o rallentare il riscaldamento globale

di Kate Marvel

IN BREVE

Per prevedere con precisione di quanto si riscalderà la Terra in seguito al cambiamento climatico, gli scienziati devono stabilire qual è il ruolo delle nuvole, che è significativo.

Per i modelli computerizzati è difficile simulare la mutevole natura delle nubi, ma dati satellitari migliori rispetto al passato forniscono indizi forti: le nuvole d'alta quota probabilmente saliranno ancora più in alto, le bande di nuvolosità e di sereno potrebbero spostarsi dalle basse latitudini verso i poli e le nuvole potrebbero farsi più povere di ghiaccio e più ricche d'acqua.

I dati indicano che le tendenze che amplificano il riscaldamento sono forti, e quelle che lo rallentano sono più deboli del previsto.

CLIMA

Il rompicapo delle nuvole

Kate Marvel è *associate research scientist* presso il Dipartimento di fisica e matematica applicate della Columbia University e il Goddard Institute for Space Studies della NASA.

Odio le nuvole. Non perché a volte portano la pioggia, ma perché sono difficili. Ce ne sono di tutti i tipi e di tutte le misure: cirri alti e sottili, cumuli rigonfi, bassi stratocumuli grigi che pesano sulle giornate scure. Una forte diversità che rende difficile prevedere come reagiranno le nuvole in tutto il mondo ai cambiamenti in corso nell'atmosfera terrestre.

Grazie a enormi quantità di dati, noi climatologi sappiamo che la Terra si riscalderà in questo secolo e anche dopo. Ma siamo in difficoltà nel definire con precisione quanto più calda sarà: un grado? O due, tre, quattro? La risposta dipende in larga misura dalle nubi. Il cambiamento climatico influisce sulla distribuzione delle nubi in atmosfera, il che a sua volta potrebbe rallentare il riscaldamento globale o accelerarlo. Conoscere questo esito potrebbe essere utile per guidare le azioni del mondo oggi e domani.

Gruppi di esperti hanno sviluppato più di 20 raffinati modelli climatici, testati su grandi insiemi di dati sul clima. Tutti questi modelli mostrano che la Terra si riscalda in risposta alle attuali emissioni di gas serra, ma per anni sono stati in disaccordo sulle nubi. Tutto questo sta cambiando. Le simulazioni degli effetti delle nuvole cominciano a convergere. Dati satellitari e altre osservazioni iniziano a rivelare come i mutamenti della copertura nuvolosa agiscono sul pianeta. Queste nuove informazioni ci danno qualche speranza o aumentano le nostre paure?

Grandi e piccoli feedback

Immaginiamo la Terra poco prima della rivoluzione industriale. Su sei continenti gli esseri umani hanno abbattuto foreste per ricavare pascoli e costruire città. Ma la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è rimasta stabile, 280 parti per milione (ppm), per migliaia di anni. Poi arriva il motore a combustione interna. Facciamo un balzo a fine Novecento e troviamo che le concentrazioni di CO_2 sono aumentate in modo vertiginoso. Il contraccolpo si ripercuote su tutto il sistema planetario. La troposfera che contiene l'aria che respiriamo si sta riscaldando. Nel 2017 la concentrazione di CO_2 è superiore a 400 ppm. I continenti e i mari poco profondi si stanno riscaldando. La circolazione dell'aria e del vapore acqueo in atmosfera sta cambiando. Se gli andamenti attuali proseguiranno, entro la metà del secolo i livelli di CO_2 in atmosfera raddoppieranno rispetto a quelli preindustriali. Ci sarà altro riscaldamento. Alla fine, dopo centinaia di anni, il pianeta raggiungerà un nuovo equilibrio a temperature più alte.

La risposta del pianeta al raddoppio dell'anidride carbonica è detta sensibilità climatica all'equilibrio (ECS, da *equilibrium climate sensitivity*). Tutti i modelli climatici dicono che l'ECS è maggiore di zero: dovremmo aspettarci un riscaldamento. Ma il livello di riscaldamento previsto va da circa 2 a 4,5 gradi, da significativo a catastrofico.

I modelli non concordano tra loro soprattutto perché sono in disaccordo su quello che faranno le nuvole in futuro. Capendole meglio potremmo fare previsioni più precise. Ma determinare l'influenza delle nubi è difficile per due ragioni: il riscaldamento agisce in modo diverso sui diversi tipi di nuvole; i cambiamenti delle nuvole influiscono sul riscaldamento in modi diversi.

Questa interazione bidirezionale è chiamata *feedback*. Alcuni feedback climatici sono ben compresi. Il ghiaccio marino, per esempio, è bianchissimo, e dunque riflette verso lo spazio la maggior parte dei raggi solari incidenti; ma quando si scioglie espone acque più scure, che non riflettono così tanto la luce solare. Questo fa riscaldare l'aria in misura maggiore, il che fa sciogliere altro ghiaccio assai riflettente, esponendo altra superficie oceanica più scura, riducendo ancora la quantità di luce solare riflessa: il ciclo di feedback cresce, accelerando il riscaldamento globale. Questo feedback in aumento, o «positivo», lo comprendiamo bene, e la maggior parte dei modelli concorda ragionevolmente su come potrebbe influire sul cambiamento climatico.

Capire i feedback delle nuvole è più complicato. Come archivisti di un museo di storia naturale, i climatologi hanno elaborato una tassonomia rozza delle nuvole, raggruppandole in base a caratteristiche distintive. Due di quelle fondamentali sono altezza sopra la superficie terrestre e opacità. Le nubi basse possono essere relativamente trasparenti, come sbuffi sparsi in un giorno di Sole, oppure opache, come il manto uniforme di un nebbione costiero. E anche le nubi d'altra quota possono andare dai cirri sottili che lasciano passare quasi tutta la luce del Sole ai torreggianti cumulonembi che rabbuiano i cieli nel corso dei temporali.

Questa tassonomia è utile perché evidenzia i principali modi in cui le nubi riscaldano o raffreddano il pianeta. Alcune nuvole intensificano l'effetto serra: intrappolano il calore che sale dal pianeta e ne irradiano solo una parte verso lo spazio; senza di esse il pianeta sarebbe più freddo. Le nuvole degli strati più alti e freddi dell'atmosfera sono particolarmente efficaci in questo senso.

Altre nuvole hanno l'effetto opposto: impediscono fin dall'inizio alla luce solare di arrivare alla superficie della Terra, mantenendo fresco il pianeta. L'effetto è più pronunciato per le nuvole basse e spesse. Nel clima attuale, questa influenza è più grande del contributo delle nuvole all'effetto serra. Oggi il raffreddamento netto dovuto alle nuvole è immenso, circa cinque volte più grande del riscaldamento che produrrebbe un raddoppio della CO_2.

Questo vuol dire che cambiamenti anche piccoli della copertura nuvolosa possono avere grandi impatti. Se aumentano le nubi alte e trasparenti che lasciano passare la luce del Sole ma non fanno uscire il calore, allora la Terra si riscalda. Se aumentano quelle

In una giornata tipica, le nuvole coprono circa il 70 per cento del pianeta, influenzando fortemente il clima. Qui coprono l'Oceano Pacifico.

Getty Images

basse e opache che respingono la luce solare, allora la Terra si raffredda. Anche le migrazioni delle nubi sono importanti: se quelle riflettenti si spostano dalle soleggiate latitudini tropicali e subtropicali verso i poli freddi e bui, l'effetto di raffreddamento diminuisce. E conta anche l'altitudine: se le nuvole in quota salgono ancora, verso zone più alte e più fredde dell'atmosfera, aumenta il loro contributo all'effetto serra. In un mondo più caldo, poi, potrebbe cambiare anche il rapporto tra cristalli di ghiaccio e gocce d'acqua delle nubi fredde, rendendole più umide e spesse, e dunque più efficienti nel bloccare la luce solare in arrivo.

Nessuno di questi effetti avviene isolatamente, motivo per cui i modelli sono in conflitto. Alcuni mostrano feedback fortemente positivi, che amplificano in modo significativo il riscaldamento. Altri presentano feedback debolmente negativi, che rallentano di poco il riscaldamento. I modelli che prevedono i feedback positivi più elevati sono quelli che poi arrivano ai valori più elevati dell'ECS, verso l'estremo superiore dell'intervallo 2-4,5 gradi.

Non c'è da sorprendersi se i modelli non simulano bene le nuvole, perché le nuvole sono grandi e piccole allo stesso tempo. Sono fatte di gocce d'acqua e cristalli di ghiaccio minuscoli, ma in qualsiasi momento coprono oltre il 70 per cento della superficie terrestre. Nel programmare un modello, dobbiamo scegliere: avvicinarci e simulare esplicitamente il moto turbolento delle gocce a cui si deve il formarsi e il dissolversi di ciascuna nube in un'area ridotta, o simulare i moti su larga scala dell'aria in salita e in discesa che distribuiscono il vapor d'acqua intorno al pianeta. Non possiamo effettuare entrambe le simulazioni, perché ci vorrebbe troppa potenza di calcolo per seguire il comportamento istante per istante di tutte le gocce d'acqua in tutta l'atmosfera.

Quindi cerchiamo di combinare grandi e piccole scale, sapendo che bisognerà fare dei compromessi. Un modello climatico globale cerca di trovare parametri semplificati che descrivono il comportamento aggregato. Sviluppiamo questi parametri basandoci sulla fisica dell'atmosfera e li testiamo e miglioriamo confrontandoli con modelli a scala più fine fatti girare su aree più piccole del globo.

Eppure, ancora non c'è un modo perfetto per miscelare grande e piccolo. Ma si può migliorare?

Forze che cambiano

Cominciamo dalla prima sfida: le nubi d'alta quota. Le misure effettuate ci danno buone ragioni per pensare che il cambiamento climatico rimodellerà a fondo l'atmosfera, spingendo ancora più in alto il limite tra troposfera – lo strato più basso dell'atmosfera, dove si verificano i fenomeni meteorologici – e la stratosfera subito sopra di essa. Le nubi d'alta quota, sospettiamo, saliranno anch'esse insieme a questo confine.

Mark Zelinka, scienziato del Lawrence Livermore National Laboratory, ha riflettuto sulle implicazioni di questa risalita. Via via che si riscalda a causa della CO_2, dice Zelinka, la Terra cerca di raffreddarsi perdendo energia sotto forma di radiazione infrarossa emessa nello spazio. Se le nuvole d'alta quota rimanessero alla loro tipica altitudine, si riscalderebbero con l'atmosfera e, nel farlo, aumenterebbero la quantità di calore che perdono verso lo spazio. Zelinka e altri pensano però che le nuvole d'alta quota saliranno ancora più in alto, restando più o meno alla stessa temperatura che sembrano preferire ora. Di conseguenza non irradierebbero nello spazio molta dell'energia termica in aumento, e quell'energia andrebbe a riscaldare ancora di più l'atmosfera. Si tratta di un feedback positivo: salendo più in alto, le nubi d'alta quota riducono ulteriormente la capacità di raffreddarsi di un pianeta che si riscalda.

Passiamo alle nubi di bassa quota. I modelli sembrano d'accordo: un mondo più caldo significa meno nubi basse. Però Mark Webb, climatologo del Met Office – il servizio meteorologico del Regno Unito – e del Cloud Feedback Model Intercomparison Project, sa che le cose sono più complicate. Con i colleghi Webb dibatte sul perché un pianeta più caldo potrebbe avere meno nubi basse. Il meccanismo sembra dipendere da come l'aria umida delle nubi basse è diluita dalla convezione o dalla turbolenza dell'aria più secca al di sopra. I modelli convenzionali, dice Webb, non hanno la potenza di calcolo necessaria per rappresentare questi processi locali in modo diretto e finiscono per approssimarli diversamente. I vari modelli indicano cambiamenti grandi o piccoli della copertura nuvolosa bassa, ma il punto è che la maggior parte ne prevede la riduzione. Meno nubi significa meno luce solare riflessa nello spazio, altro feedback positivo che amplifica il riscaldamento.

C'è ancora un altro effetto da considerare. La circolazione complessiva dell'atmosfera è in larga misura guidata dalla differenza di insolazione e temperatura tra l'equatore e i poli. L'aria calda dei tropici sale, e nel farlo si raffredda. Una volta alta nel cielo, comincia a spostarsi lateralmente verso i poli, più freddi. Lungo il cam-

Caldo o freddo? L'effetto dei cambiamenti delle nuvole sulla Terra

Su scala globale, variazioni di latitudine o di quota delle nuvole (o della miscela di vapore e ghiaccio di cui sono fatte) possono riscaldare o raffreddare la Terra. Secondo i dati dei satelliti, alcuni cambiamenti mostrati qui sono già in corso. Finora tende a prevalere il riscaldamento, e la tendenza potrebbe accentuarsi.

Illustrazione di Jen Christiansen

mino si raffredda abbastanza da scendere di nuovo verso la superficie, attorno ai 30 gradi di latitudine, diventando più calda e più secca nella discesa. In superficie abbiamo climi piovosi sotto le bande d'aria tropicali che salgono e perdono acqua mentre si raffreddano, e climi desertici sotto le bande in cui l'aria scende.

Il cambiamento climatico sposterà questa distribuzione. Le alte latitudini settentrionali si riscalderanno più rapidamente dei tropici, un fenomeno detto amplificazione artica, che riduce la differenza di temperatura tra poli ed equatore. Questa riduzione già in corso cambia tutto. Ma la cosa più importante, forse, è che i tropici si espandono, spingendo le bande piovose e secche verso i poli. Uno degli effetti sul terreno è che le zone ai margini – il Mediterraneo, il Sahel, il Sudovest degli Stati Uniti – diventeranno probabilmente più aride. I rilevamenti satellitari che ho analizzato di recente con Céline Bonfils, del Lawrence Livermore, mostrano che gli andamenti delle precipitazioni si stanno spostando proprio come previsto. Se le nuvole seguono questa migrazione, allora i banchi di nubi riflettenti potrebbero essere spinti dalle basse latitudini verso latitudini più elevate, dove la luce solare in arrivo è più debole, riducendone l'effetto di raffreddamento rispetto a quello che avevano nella consueta posizione sopra i tropici.

Modelli climatici migliori dovranno includere un'altra complicazione: un mondo più caldo potrebbe cambiare la composizione delle nubi. Le nubi contengono gocce d'acqua e piccoli cristalli di ghiaccio. Le nubi basse e dense tendono a essere più acquose e opache di quelle alte e sottili, che tendono a essere più ghiacciate. In un mondo più caldo, una frazione maggiore di ghiaccio delle nubi in quota diventa liquida, rendendole più opache e bloccando più luce solare in arrivo. Il disgelo delle nubi di ghiaccio le renderà più «acquose», dice Zelinka, generando un feedback negativo, un importante effetto di raffreddamento che limita il riscaldamento.

Una previsione più precisa

La natura mutevole delle nubi fa sembrare ancora più difficile che i modelli possano ridurre l'incertezza nelle previsioni di aumento delle temperature globali, in modo da restringere la forbice tra 2 e 4,5 gradi. Tuttavia, c'è un gruppo importante di dati che conta più di tutti gli altri: si tratta dei dati storici su quello che è già accaduto.

Misuriamo le nubi almeno da quando abbiamo iniziato a mettere in orbita satelliti meteorologici, negli anni ottanta. Possiamo confrontare i nostri modelli con le osservazioni effettive per migliorarli. Tuttavia, alcune delle misurazioni satellitari più vecchie possono essere problematiche. Gli strumenti di ripresa fotografica dei satelliti per osservazioni terrestri possono trovare le nubi cercando oggetti bianchi su sfondo scuro, ma faticano a distinguere fra oggetti bianchi diversi tra loro, in particolare nubi di ghiaccio, bianche, su terreni innevati. Inoltre, le nubi d'alta quota possono oscurare i cambiamenti delle coperture nuvolose a quote più basse.

Negli ultimi dieci anni però le osservazioni sono migliorate parecchio, soprattutto grazie all'A-train, o Afternoon Constellation, della NASA, un gruppo di sei satelliti per l'osservazione terrestre che volano in formazione, bruciando carburante per mantenere un'orbita stabile. Due di essi, CloudSat e CALIPSO, forniscono informazioni di valore inestimabile. CloudSat usa onde radio che penetrano facilmente le sottili nubi d'alta quota per misurare le nubi basse più dense; può anche dire se da quelle nubi sta piovendo o nevicando. CALIPSO usa radar basati su laser, detti LIDAR, per ottenere immagini delle nuvole; può dire se le nubi sono fatte di cristalli di ghiaccio o gocce d'acqua liquida.

Insieme questi satelliti hanno migliorato la nostra comprensione della copertura nuvolosa, e forniscono indizi su come potrebbe cambiare in futuro. Per esempio, le osservazioni sembrano sostenere l'idea secondo cui le nuvole in quota saliranno ancora via via che il pianeta si riscalderà, riducendo la capacità della Terra di raffreddarsi. E uno studio recente mostra che solo alcune nubi in quota contengono più acqua e meno ghiaccio rispetto a quanto previsto. Questo significa che il feedback negativo associato al fatto che le nuvole diventano più «acquose» potrebbe essere meno forte di quanto pensato.

CloudSat e CALIPSO sono stati lanciati nel 2006, quindi le serie dei loro dati sono troppo corte per rilevare effetti del cambiamento climatico sullo sfondo della variabilità naturale del clima.

**ma non quanto ci aspettavamo*

Per aggiungere una prospettiva, gli scienziati stanno unendo le precedenti osservazioni ottenute da sistemi progettati per seguire gli andamenti a breve termine del meteo. Due iniziative degne di nota sono l'International Satellite Cloud Climatology Project e il progetto Pathfinder Atmospheres–Extended. Purtroppo, dice Mark Richardson, del Jet Propulsion Laboratory della NASA, i vari satelliti meteorologici inclusi in queste ricerche sono stati progettati in modo diverso fra loro e raccoglievano i dati in momenti diversi della giornata. Eppure in questi archivi ci sono indizi, se si sa dove guardare. In uno studio del 2015, Zelinka e io abbiamo provato a cercarli.

Siamo partiti da una domanda semplice: nelle osservazioni, quali sono le latitudini più nuvolose e quelle in cui il cielo è più chiaro? Come ci aspettavamo, abbiamo trovato i picchi di nuvolosità ai tropici. La copertura nuvolosa era relativamente alta anche in certe bande strette delle medie latitudini, dove le tempeste sono alimentate dai venti prevalenti. Nelle latitudini subtropicali «desertiche», l'alta pressione atmosferica portava invece a condizioni secche e soleggiate che impedivano la formazione delle nuvole: le bande più chiare in assoluto.

In seguito siamo andati a vedere se le posizioni delle latitudini più nuvolose e di quelle più serene sono cambiate nei dati satellitari sul lungo periodo, dal 1984 al 2009. Quello che abbiamo trovato è notevole: le latitudini medie più nuvolose e quelle subtropicali più serene erano spinte verso i poli, proprio come ci avevano detto i modelli. In più, ognuno degli insiemi di dati indipendenti concordava sul fatto che il cambiamento degli schemi della circolazione atmosferica trascinava gli schemi della copertura nuvolosa verso i poli. Grazie al confronto con i modelli climatici fatti girare in modalità che non includono le emissioni umane, abbiamo stabilito che questi cambiamenti erano troppo forti per poter essere attribuiti alla sola variabilità naturale. Ed erano più forti di quanto predetto dagli scienziati.

Le implicazioni sono preoccupanti. Se i banchi di nubi basse e altamente riflettenti sono spinti troppo verso i poli, la loro capacità di raffreddamento si ridurrà di molto: bloccheranno raggi solari deboli e temperati invece dell'intensa luce dei tropici. Questa migrazione sarebbe un forte feedback positivo e porterebbe a una sensibilità climatica più alta.

Anche uno studio successivo condotto da Joel Norris, dell'Università della California a San Diego, che ha considerato le differenze note dei dati satellitari, ha trovato uno spostamento verso i poli degli schemi della copertura nuvolosa. Questi dati suggeriscono inoltre che le nubi d'alta quota potrebbero essere ancora in risalita. Gli scienziati discutono sulla significatività di questi cambiamenti, chiedendosi se possano essere attribuiti alle emissioni di gas serra, alla diminuzione del particolato scagliato in atmosfera dall'eruzione del 1991 del Monte Pinatubo, alla variabilità naturale o a qualche combinazione di tutti questi fattori. Una cosa però è chiara: le osservazioni a lungo termine non danno alcuna indicazione sul fatto che le nuvole rallenteranno il riscaldamento.

Le nuvole non ci salveranno

Il quadro che emerge dalle osservazioni sta diventando più chiaro. Le nuvole in quota si stanno innalzando, e c'è un generale spostamento degli schemi di nuvolosità verso i poli. Tutte e due le tendenze dovrebbero accelerare il riscaldamento del pianeta. Le osservazioni a breve termine suggeriscono che la riduzione delle nubi tropicali bloccherà meno luce solare, e che la fusione di ghiaccio delle nuvole potrebbe frenare il riscaldamento meno di quanto pensavamo. C'è poco di confortante, insomma.

Pensiamo quindi che le nuvole spingeranno il riscaldamento verso l'estremo superiore dell'intervallo dell'ECS? La sensibilità climatica all'equilibrio è una grandezza teorica, che descrive la risposta finale del clima a un rapido raddoppio della CO_2 atmosferica: uno scenario artificiale che ci dà una modalità reale di esplorazione. Ma l'incremento della CO_2 non è teorico; al raddoppio si arriverà verso la metà del secolo, se tutti i paesi non cambieranno strada. Nuove osservazioni satellitari, modelli a risoluzione più elevata e creatività dei giovani scienziati ci aiuteranno dire con più precisione di quanto il pianeta diventerà più caldo.

Nel frattempo c'è da lavorare su un altro dato ancora che si rifiuta di cambiare, ed è più decisivo: il 50 per cento della popolazione degli Stati Uniti che non accetta il fatto che gli esseri umani stanno modificando il clima. Se le emissioni di CO_2 continueranno indisturbate, la Terra si scalderà di molto. Le nuvole, pare, peggioreranno le cose o, come minimo, non faranno nulla che possa alleviare il problema. È un compito che spetta a noi. ■

PER APPROFONDIRE

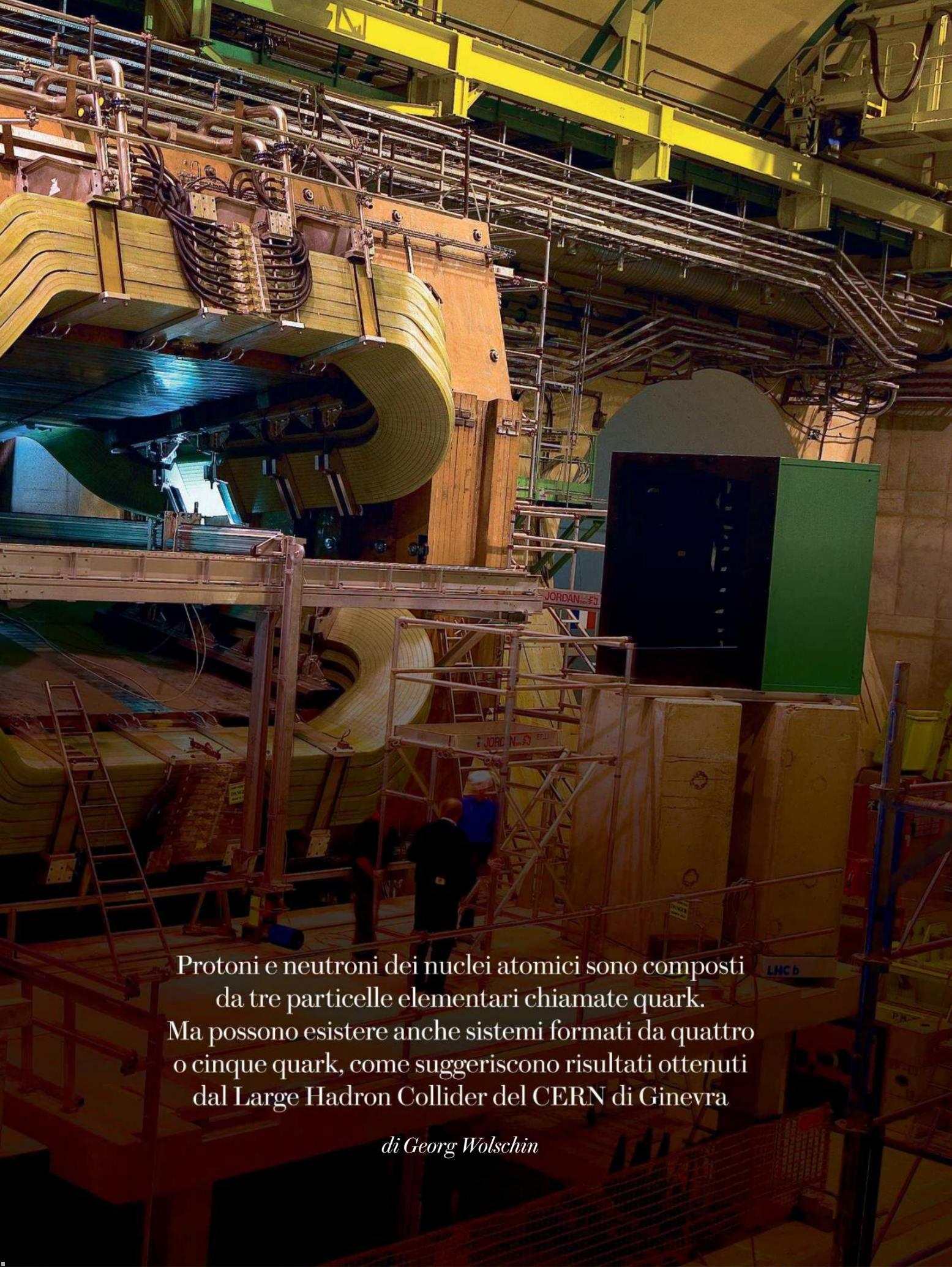
External Influences on Modeled and Observed Cloud Trends. Marvel K. e altri, in «Journal of Climate», Vol. 28, n. 12, pp. 4820-4840, 11 giugno 2015.

Evidence for Climate Change in the Satellite Cloud Record. Norris J.R. e altri, in «Nature», Vol. 536, pp. 72-75, 4 agosto 2016.

La migrazione delle piogge. Sachs J.P. e Myhrvold C.L., in «Le Scienze» n. 513, maggio 2011.

Con il rivelatore LHCb al CERN di Ginevra, qui durante la fase di costruzione, i fisici cercano fra l'altro sistemi di multiquark. Sono ben riconoscibili i giganteschi magneti che indirizzano le particelle generate nel decadimento dei multiquark su traiettorie caratteristiche.

FISICA DELLE PARTICELLE

Sulle tracce dei multiquark

Protoni e neutroni dei nuclei atomici sono composti da tre particelle elementari chiamate quark. Ma possono esistere anche sistemi formati da quattro o cinque quark, come suggeriscono risultati ottenuti dal Large Hadron Collider del CERN di Ginevra

di Georg Wolschin

Georg Wolschin è professore all'Istituto di fisica teorica dell'Università di Heidelberg.

All'inizio degli anni sessanta i fisici dovettero affrontare un problema: nel decennio precedente, durante alcuni esperimenti, avevano scoperto numerose nuove particelle per le quali non c'era ancora un ordinamento sistematico. All'inizio questo «zoo di particelle» era incomprensibile, poi aveva cominciato lentamente ad assumere un ordine grazie a metodi matematici. Questo passo in avanti aveva suggerito che le particelle conosciute fino ad allora non fossero solitamente particelle elementari, come invece si era pensato, ma fossero composte da pochi elementi di base.

Nel 1964 due teorici statunitensi svilupparono l'uno indipendentemente dall'altro il modello dei quark, secondo cui protone e neutrone (*si veda il box alle pp. 66-67*), per esempio, sarebbero composti ciascuno da tre particelle puntiformi, considerate in un primo tempo ipotetiche. Uno dei due ricercatori era Murray Gell-Mann, del California Institute of Technology; nel 1969 Gell-Mann fu premiato con il Nobel per la fisica «per i suoi contributi e scoperte concernenti la classificazione delle particelle elementari e le loro interazioni». I lavori assai più dettagliati del suo collega George Zweig erano circolati come «CERN Reports», ma dopo un intervento dell'allora direttore della sezione teorica del CERN non furono pubblicati su riviste scientifiche.

Gell-Mann attribuì alle nuove particelle elementari il nome di *quark*, Zweig le chiamò *aces* (come gli «assi» delle carte). Di queste nuove particelle esistono diversi tipi (o «sapori», come sono chiamati in gergo tecnico). Gli scienziati iniziarono da tre tipi di quark: un quark *up* (su), un quark *down* (giù) e un quark *strange* (strano). In seguito, soprattutto per chiarire le strutture di altre particelle, vennero scoperte tre varianti più pesanti: *charm* (incanto), *bottom* (basso) e *top* (alto). Oltre a questi «quark di valenza», da cui sono composte le particelle note come adroni, esistono anche coppie virtuali di quark-antiquark (i cosiddetti *sea quark*, o «quark del mare»), che hanno origine dal vuoto e svaniscono dopo una brevissima esistenza. Questi ultimi quark non determinano struttura e numeri quantici del protone o del neutrone, bensì, attraverso l'interazione forte, la loro massa.

Tutti i quark sono caratterizzati dai cosiddetti numeri quantici: uno spin semintero (1/2), cariche elettriche di un terzo o due terzi, come pure un «colore», che non ha nulla a che vedere con i colori reali e che può assumere tre possibili valori. Ogni antiquark ha carica opposta a quella del relativo quark. Finora non si è ancora capito perché le masse dei sei sapori di quark varino di circa cinque ordini di grandezza. Così i quark charm hanno una massa pari a 1,4 volte la massa del protone, quindi sono relativamente più pesanti. Questi quark svolgono un ruolo particolare in strutture esotiche formate da più di tre quark che presenterò più avanti, perché evidentemente sono importanti per la loro stabilità, per quanto effimera.

Oggi il modello seguente è condiviso da tutti i fisici: le particelle che fanno parte della famiglia dei cosiddetti barioni, che per esempio nella forma di neutroni (due quark down e un quark up) e di protoni (due quark up e un quark down) costituiscono i nuclei di tutti gli atomi, sono formate ciascuna da tre quark, mentre quelle della famiglia dei mesoni, che hanno vita breve (per esempio pioni, kaoni, mesoni J/ψ e molti altre), sono formati da una coppia costituita da un quark e da un antiquark. Tutte queste particelle sono tenute insieme da particelle adesive chiamate gluoni.

I gluoni sono i vettori dell'interazione forte, e come i fotoni, i vettori della forza eletromagnetica, sono elettricamente neutri e privi di massa. Possono però essere caratterizzati dalle combinazioni dei tre colori e dei loro anticolori, possibili nella teoria quantistica. Invece le particelle fortemente interagenti, gli adroni, create dai gluoni partendo da due o tre quark di valenza, sono sempre prive di colore e formano quindi i cosiddetti singoletti di colore.

Realtà o costruzioni mentali?

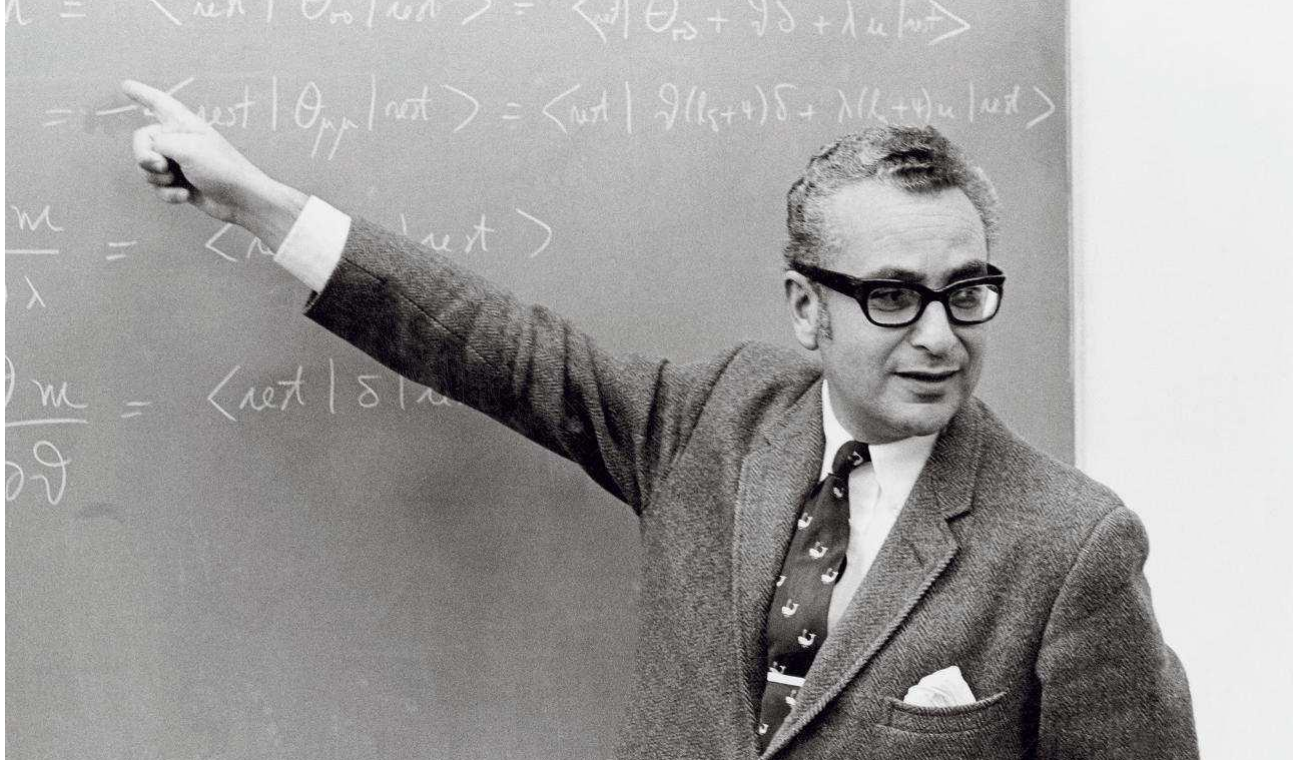
Negli anni sessanta questo concetto non era affatto ovvio. Gell-Mann era un fisico influente, e aveva aiutato questo modello a sfondare, ma in realtà non credeva all'esistenza fisica dei quark, che considerava piuttosto un aiuto per il calcolo di determinate strutture.

Zweig invece era convinto fin dal principio che i quark aves-

IN BREVE

Negli anni sessanta i fisici sperimentali scoprirono che il protone e il neutrone sono composti da particelle ancora più elementari. I fisici teorici elaborarono quindi un modello per questi componenti di base: i quark.

Negli anni successivi fu scoperto un numero sempre più grande di quark. Oggi il modello standard della fisica delle particelle ne conta sei.

I fisici hanno già dimostrato l'esistenza di strutture con quattro e cinque quark. Esperimenti futuri dovrebbero fare luce sulle modalità di formazione di queste particelle esotiche.

Il padre dei quark. Lo statunitense Murray Gell-Mann in una foto del 1969, anno in cui ha ricevuto il premio Nobel per la fisica per le sue ricerche sulla classificazione delle particelle elementari.

Physics Today Collect/SPL/AGF

sero una corrispondente realtà fisica e propose di studiarli sperimentalmente. Però non fu possibile rilevare i quark come particelle libere dotate di cariche frazionarie. Di norma, infatti, i quark sono uniti fra loro con forza dai gluoni e restano confinati negli adroni. Solo in condizioni estreme di temperatura o di pressione – per esempio quelle che si manifestano in collisioni relativistiche di ioni pesanti o le condizioni che dominarono nell'universo primitivo fino a dieci microsecondi dopo il big bang – dovrebbe formarsi per breve tempo un mare di quark e di gluoni liberi: un plasma di quark e gluoni.

Alla fine, la scoperta dei quark fu possibile grazie a varie nuove idee introdotte nella seconda metà degli anni sessanta e che risalgono essenzialmente al teorico statunitense James D. Bjorken. I fisici iniziarono a sparare elettroni ad alta energia – che in qualità di particelle puntiformi non hanno alcuna struttura – indirizzandoli su protoni, per investigarne la struttura interna. In particolare, negli anni settanta allo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) di Palo Alto, in California, i ricercatori studiarono la diffusione di elettroni con un'energia di oltre 7 gigaelettronvolt (miliardi di elettronvolt, GeV) in idrogeno liquido. I famosi esperimenti di diffusione di Ernest Rutherford con raggi alfa all'inizio del Novecento permisero di capire che gli atomi avevano una struttura formata da un nucleo e da un guscio; allo stesso modo nel 1969 furono individuati i «partoni», 100.000 volte più piccoli, i componenti puntiformi e carichi dei protoni.

Le proprietà decisive di queste particelle coincidevano con quelle dei quark. Gli scienziati avevano anche dimostrato che l'interazione forte – in contrasto con l'elettrodinamica quantistica, che descrive l'interazione elettromagnetica – diventa tanto più debole quanto più in profondità si penetra nel protone. Oggi sappiamo che questa è una proprietà fondamentale di una teoria per l'interazione forte, la cosiddetta cromodinamica quantistica.

Le prime indicazioni sperimentali sull'esistenza dei gluoni emersero nel 1979 al collisore PETRA (acronimo di Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage) del Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) di Amburgo. Grazie a collisioni altamente energetiche fra elettroni e positroni (le antiparticelle degli elettroni), i ricercatori di PETRA producevano coppie formate da quark e antiquark, che ogni volta venivano proiettate in direzioni opposte e generavano due getti di altre particelle a causa dell'interazione forte. Ma avevano rilevato anche eventi con tre getti del genere: era chiaro che in questi casi doveva avere partecipato un'altra particella. In seguito, analisi più esatte dimostrarono che queste terze particelle dovevano essere i gluoni, che già da tempo erano oggetto di ricerche.

Così i quark avevano assunto un'inattesa forma fisica reale. Tuttavia, già nel 1964 sia Zweig sia Gell-Mann avevano previsto che i barioni potevano essere formati anche da cinque quark o assi: oltre ai tre soliti quark di valenza, questi barioni dovevano contenere anche una coppia di quark-antiquark aggiuntiva; e i mesoni potevano essere formati da due coppie quark-antiquark, cioè da quattro quark. Queste strutture si chiamano pentaquark e tetraquark, sono sistemi multiquark compatibili con il modello standard della fisica delle particelle. A differenza dei virtuali quark del mare, i quark aggiuntivi determinano la struttura e i numeri quantici.

Oggi molti studi teorici, basati su specifici modelli della cromodinamica quantistica, sono dedicati soprattutto al calcolo della vita media degli stati a multiquark. Queste vite medie sono molto brevi, meno di 10^{-21} secondi, dunque le condizioni negli esperimenti non sono rilevabili in modo diretto. Per le misurazioni sono disponibili solo prodotti di decadimento duraturi. Tuttavia, dai massimi degli spettri di massa e dalle distribuzioni caratteristiche dei prodotti di decadimento a seconda dell'angolo di dispersione possono essere derivati numeri quantici rilevanti, come spin e parità (cioè la ripetizione immutata di un fenomeno fisico per inversione delle coordinate spaziali) dei multiquark.

Così, nel corso di molti anni, la ricerca dei sistemi a multiquark si è sviluppata in un settore della fisica sperimentale delle particelle, che è entrata in numerosi vicoli ciechi ma che ha conseguito anche qualche successo. Quello più recente è stato ottenuto dalla collaborazione LHCb al Large Hadron Collider del CERN di

I multiquark negli esperimenti

Pentaquark

Protone

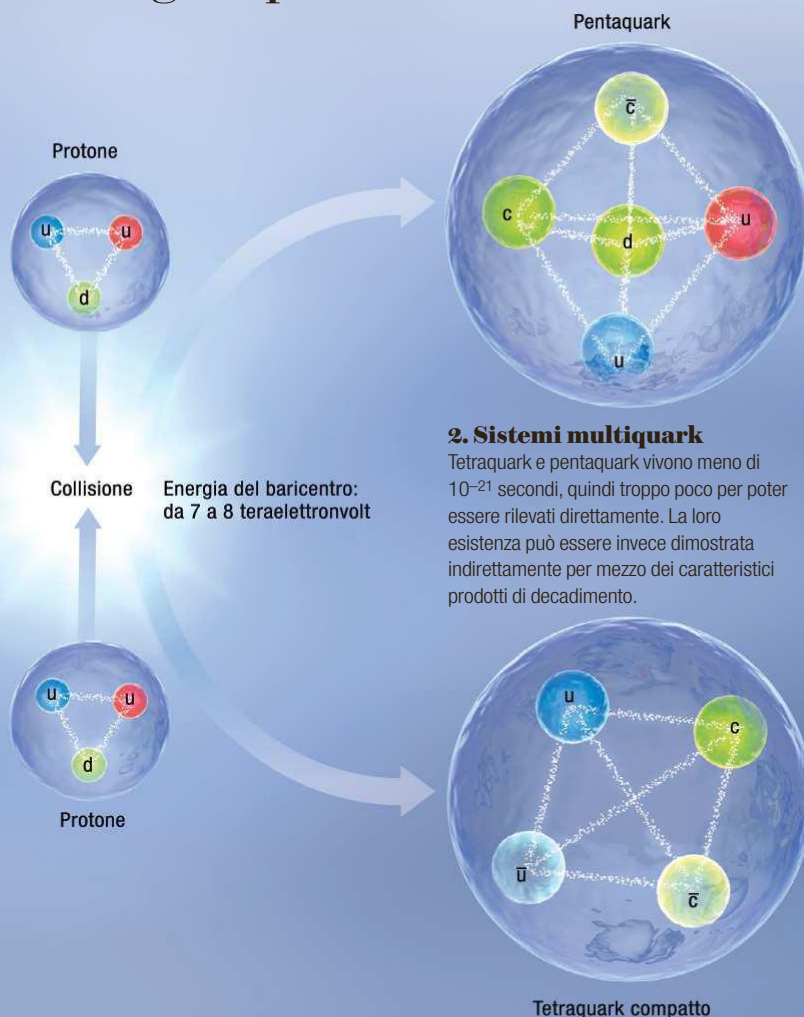
1. Collisione

In esperimenti come LHCb, del CERN di Ginevra, i fisici producono collisioni tra protoni ad alta energia; in queste collisioni sono generate nuove particelle. Nei vari passaggi intermedi possono essere generati anche sistemi multiquark, che finora sono stati osservati indirettamente fino ai livelli dei tetraquark e pentaquark (adroni composti da quattro e cinque quark).

Collisione

Energia del baricentro: da 7 a 8 teraelettronvolt

Protone

Tetraquark compatto

2. Sistemi multiquark

Tetraquark e pentaquark vivono meno di 10^{-21} secondi, quindi troppo poco per poter essere rilevati direttamente. La loro esistenza può essere invece dimostrata indirettamente per mezzo dei caratteristici prodotti di decadimento.

Le proprietà più importanti dei quark

I quark sono componenti elementari della materia. Ne esistono sei tipi, divisi in tre coppie che formano le cosiddette «generazioni», e sono tutti dei «fermioni», ovvero seguono una regola per cui due quark con proprietà quantistiche identiche non possono trovarsi insieme in uno stesso sistema.
Queste sei particelle elementari si distinguono chiaramente per la massa e hanno una carica elettrica pari a un terzo dell'unità. A queste caratteristiche si aggiungono altre proprietà, come lo spin (il momento angolare della meccanica quantistica) e la cosiddetta parità (una trasformazione prodotta in modo analogo alla riflessione a uno specchio).

Generazione	Quark/Antiquark		Carica (e)	Massa (MeV)
1	up	u	+2/3	2,3
	anti-up	$\bar{u}$	−2/3	2,3
	down	d	−1/3	4,8
	anti-down	$\bar{d}$	+1/3	4,8
2	strange	s	−1/3	95
	anti-strange	$\bar{s}$	+1/3	95
	charm	c	+2/3	1275
	anti-charm	$\bar{c}$	−2/3	1275
3	bottom	b	−1/3	4180
	anti-bottom	$\bar{b}$	+1/3	4180
	top	t	+2/3	173210
	anti-top	$\bar{t}$	−2/3	173210

Inoltre i quark sono portatori di una carica di colore, che corrisponde all'interazione forte. I mediatori di questa forza sono i gluoni, dall'inglese *glue*, «colla». La carica di colore esiste in tre varianti: rosso, blu e verde. Tutte e tre hanno la stessa probabilità di presentarsi, se le si somma, danno un colore neutro, mentre colore e anticolore si neutralizzano. Inoltre per ogni quark esiste un antiquark con le stesse proprietà ma con segno opposto.

Pentaquark bimolecolare

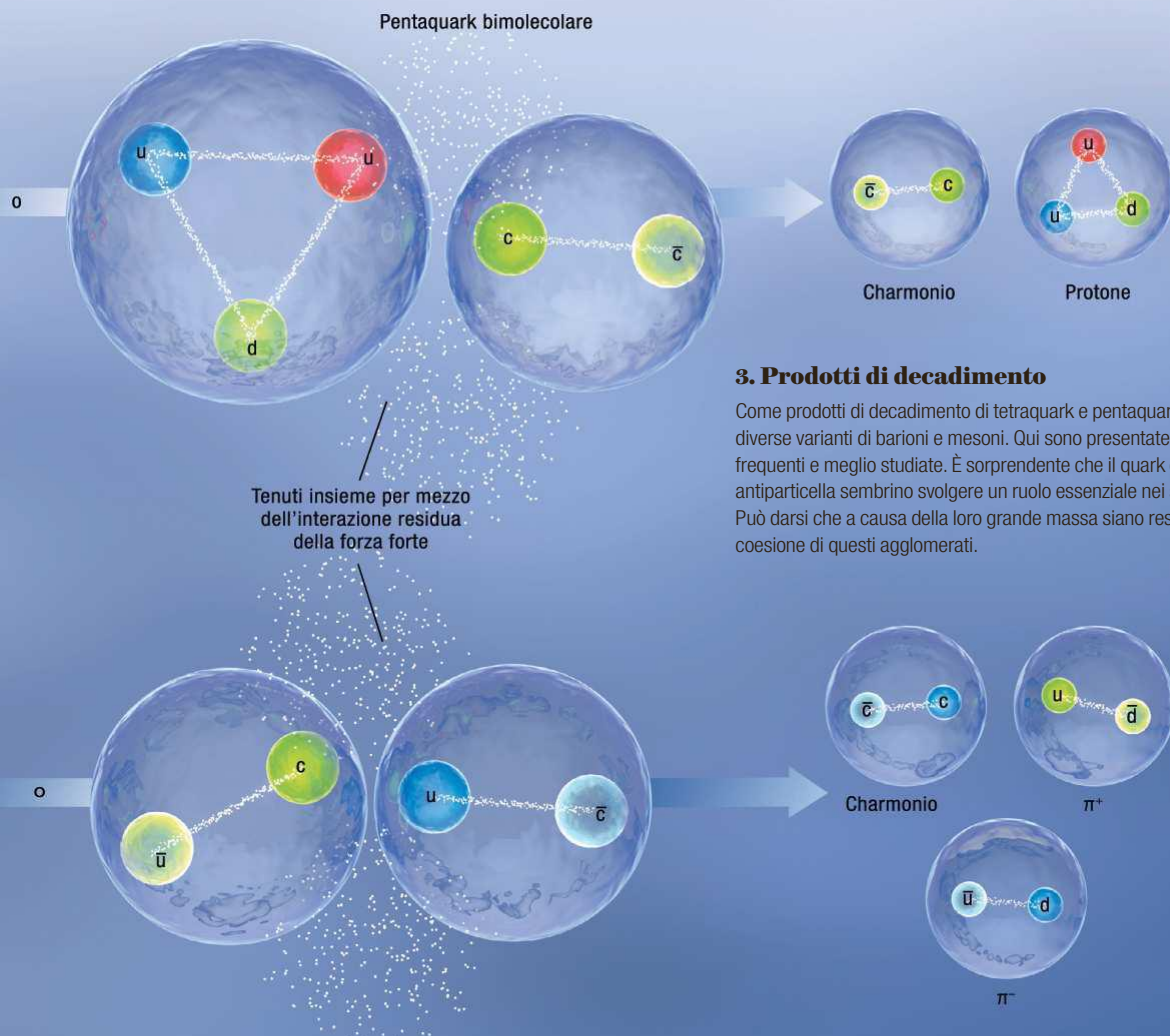
Tenuti insieme per mezzo dell'interazione residua della forza forte

Charmonio

Protone

Charmonio

π+

π−

3. Prodotti di decadimento

Come prodotti di decadimento di tetraquark e pentaquark si osservano diverse varianti di barioni e mesoni. Qui sono presentate le opzioni più frequenti e meglio studiate. È sorprendente che il quark charm e la sua antiparticella sembrino svolgere un ruolo essenziale nei sistemi multiquark. Può darsi che a causa della loro grande massa siano responsabili della coesione di questi agglomerati.

Adroni

Gli adroni sono composti da vari quark. Una classe di adroni sono i barioni, formati da tre quark. Gli esempi più noti di barioni – quelli di vita più lunga – sono il protone e il neutrone, che formano i nuclei atomici. Altri adroni sono i mesoni, con vita molto più breve (10^{-8} secondi o meno), formati da un quark e un antiquark. Sia i barioni sia i mesoni possono essere formati dalle più svariate combinazioni di quark. Devono formarsi in base alle leggi della cromodinamica quantistica ed essere di colore neutro. In natura i quark non si trovano mai da soli perché l'intensità della forza forte aumenta all'aumentare della distanza tra i quark che interagiscono tra loro.

Barioni

Gluone

Protone

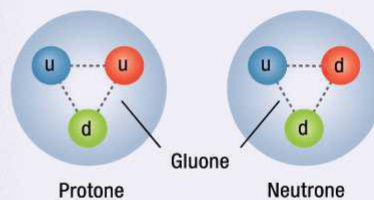
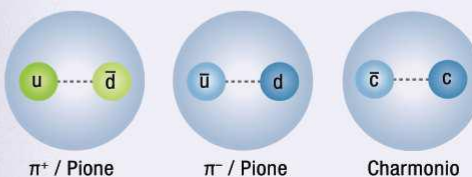
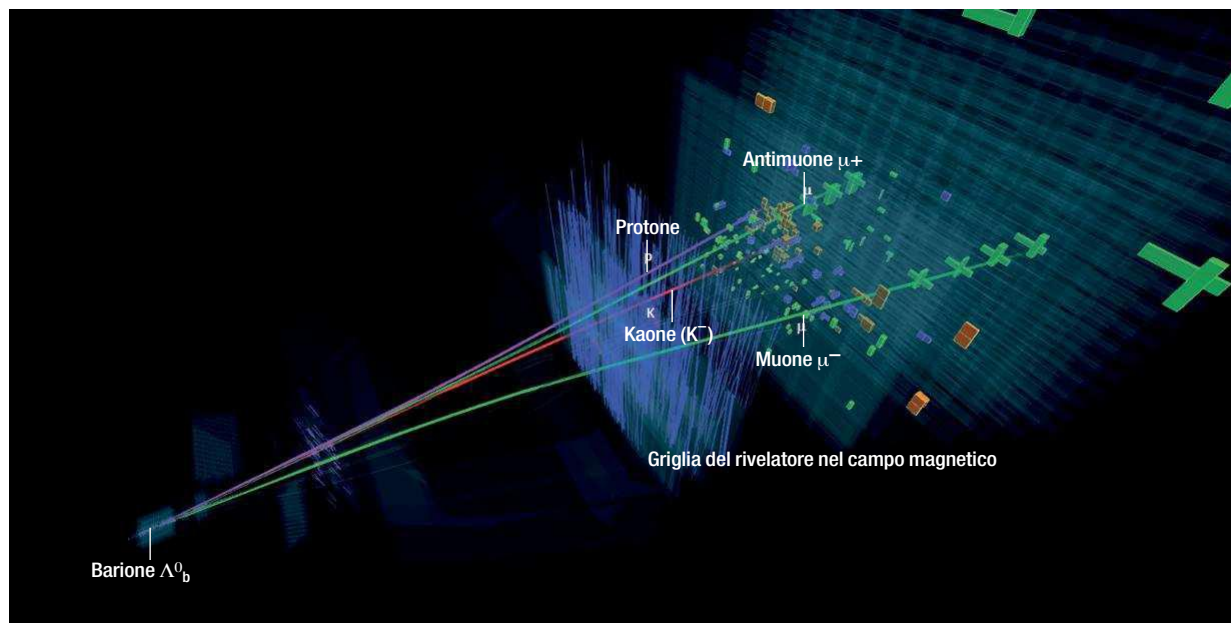
Neutrone

Mesoni

π+ / Pione

π− / Pione

Charmonio

Golden Section Graphics/Christian Eisenberg; testo: Felicitas Mokler

Inseguendo un pentaquark

Grazie al rivelatore LHCb, gli scienziati hanno potuto osservare per la prima volta il decadimento di un barione lambda Λ^0_b (formato da un quark up, un quark down e un quark bottom) in un kaone di carica negativa (K^-), uno charmonio, che decade poi in due muoni di carica opposta, e in un protone. Un campo magnetico nel rivelatore devia le particelle su traiettorie diverse in funzione della loro massa, energia cinetica e carica elettrica (*sopra*).
Nello spettro di massa del decadimento di Λ^0_b in uno charmonio (J/y) e un protone compare una risonanza in corrispondenza di 4,45 GeV, compatibile con i contributi di due stati di pentaquark composti ciascuno da due quark up, un quark down, un quark charm e un antiquark charm e con carica positiva.

Cortesia Collaborazione LHCb/CERN

Ginevra, tramite collisioni tra protoni che hanno prodotto numerose particelle, di norma già note. A energie di 7 e 8 teraelettronvolt (TeV; 1 TeV equivale a 10^{12} elettronvolt, ossia mille miliardi di elettronvolt), i ricercatori hanno trovato indizi di pentaquark (*si veda il box in questa pagina*).

Questo risultato ha sorpreso gli scienziati, che nei cinquant'anni circa trascorsi dalla previsione erano riusciti a identificare solo pochi candidati convincenti. Per esempio, dal 2002 erano disponibili relazioni su misurazioni di stati di pentaquark, in particolare della cosiddetta risonanza Θ^+. In fisica delle particelle, per risonanza si intende un sistema instabile, spesso formato da vari componenti, che dopo poco tempo torna a decomporsi.

Essere o non essere?

La risonanza Θ^+ doveva avere una massa di circa 1,6 volte la massa del protone e una vita media molto breve, circa 10^{-23} secondi. Secondo le ipotesi, era formata da due quark leggeri, up e down, e da un antiquark strange. I primi a riferire su questi pentaquark erano stati scienziati giapponesi, poi anche altri gruppi di ricerca nel mondo. Ma esperimenti successivi avevano fallito nel riprodurre queste particelle, così le pubblicazioni scientifiche erano state ritirate. Lo stesso era avvenuto con presunti pentaquark con due quark strange.

La situazione sembra migliore nel caso dei tetraquark. Nel 2003 la Belle Collaboration del KEK Research Center a Tusukuba, in Giappone, nelle collisioni fra elettroni e positroni ha trovato una risonanza netta, simile al mesone J/ψ (*charmonium* o charmonio). Quest'ultimo mesone, composto da un quark charm e un antiquark charm, è stato scoperto nel 1974, e poi misurato con precisione elevata. La risonanza decadeva in charmonio e due pioni, e quindi conteneva sia quark charm sia antiquark charm. Però con la sua durata di vita sorprendentemente lunga la risonanza non corrispondeva con lo schema, presumibilmente ben compreso, degli stati charm-anticharm.

La risonanza scoperta dalla Belle Collaboration è stata studiata anche in altri esperimenti a Stanford, al Fermilab o a LHCb, quindi non c'è alcun dubbio sulla sua esistenza. Un'analisi accurata effettuata in collaborazione con l'esperimento LHCb al CERN di Ginevra ne ha determinato con precisione massa e parità. La particella è stata chiamata X(3872), il nome deriva dalla sua massa a riposo (in megaelettronvolt/c^2), ed è oltre quattro volte più pesante di un protone. In base al suo possibile contenuto di quark di valenza (un quark charm, un antiquark charm, un quark up e un antiquark up) è un vero tetraquark; finora però la sua struttura non è stata del tutto chiarita.

In particolare potrebbe trattarsi anche di uno stato formato da un mesone D^0 e un mesone anti-D^0 eccitato, che potrebbe avere lo stesso contenuto di quark di valenza ma una struttura diversa, come quella di un vero tetraquark: per un effetto di interazione reciproca residua, i due mesoni si comporterebbero in modo simile ad atomi tenuti insieme in una molecola; si parla quindi di uno stato bimolecolare. L'esistenza di un comune mesone, formato da quark

e antiquark, non è ancora del tutto esclusa, sebbene sembri meno probabile in seguito ai risultati ottenuti nel 2013 dalla collaborazione LHCb del CERN. Gli sperimentatori si aspettano ulteriori scoperte dal questa fase operativa (il cosiddetto *run* II) di LHC, attiva dal 2015 e caratterizzata da un'energia di collisione protone-protone di 13 teraelettronvolt (TeV).

Ci sono però altri segni della reale esistenza dei tetraquark. Per esempio nel 2007 la Belle Collaboration riuscì a dimostrare, col cosiddetto $Z^+(4430)$, l'esistenza di un candidato tetraquark dotato di carica, composto da un quark charm, un antiquark charm, un quark up e un antiquark down, il cui carattere di risonanza è stati poi confermato nel 2014 dalla Collaborazione LHCb con una significatività statistica elevata: in effetti questo è un nuovo mesone esotico. Essendo dotato di carica, non può essere uno dei soliti mesoni formati da quark e antiquark dello stesso tipo. Nel giugno 2016 la Collaborazione LHCb ha pubblicato come *preprint* altri due lavori su possibili candidati a tetraquark, poi pubblicati su riviste scientifiche. [Nel novembre 2017 in due studi su «Physical Review Letters» è stato annunciato un nuovo tetraquark, N.d.R.]

La ricerca continua

Altri candidati a mesoni esotici, come $Z_c(3900)$, che è stato scoperto nel 2013 dalla Belle Collaboration e dal Beijing Electron Positron Collider e che decade in un charmonio e in un mesone leggero, suggeriscono che possano essere rilevati non solo i tetraquark, ma anche altri stati multiquark, in particolare i pentaquark.

Le particelle multiquark possono aiutarci a capire meglio l'interazione forte, una delle quattro forze fondamentali della natura

Mentre la ricerca di pentaquark formati dai quark leggeri up, down e strange ha avuto esiti negativi per lungo tempo, risultati pubblicati nel 2015 dalla collaborazione LHCb al CERN di Ginevra hanno finalmente portato a un primo grande successo. In collisioni tra protoni a energie di 7 e 8 TeV, gli scienziati hanno studiato i decadimenti di certi barioni (Λ^0_b) generati in quegli eventi. L'obiettivo era soprattutto misurare la durata della vita media di queste particelle, che decadono molto rapidamente, con un'accuratezza maggiore rispetto a quella possibile in passato. I barioni neutri hanno una massa di circa 5,6 GeV/c^2, ovvero una massa circa sei volte più grande di quella dei neutroni. Proprio come i neutroni, anche questi barioni sono composti da tre quark di valenza, ma uno dei due quark down leggeri del neutrone è sostituito da un quark bottom pesante.

In quell'esperimento i fisici non solo hanno determinato con precisione maggiore la durata della vita media – 1,48 picosecondi ($1{,}48 \times 10^{-12}$ secondi; 1 picosecondo equivale a un milionesimo di milionesimo di secondo) – ma per la prima volta hanno anche seguito il decadimento di questi barioni in un kaone con carica negativa (cioè un mesone formato da un antiquark up e un quark strange), un mesone J/ψ, composto da quark charm e antiquark charm, e un protone (formato da due quark up e un quark down). Inoltre lo spettro di massa ha mostrato caratteristiche strutture di risonanza alle energie di 4,38 e 4,5 gigaelettronvolt, corrispondenti a 4,7 volte la massa del protone. Queste risonanze decadono ogni volta in un mesone J/ψ e un protone; dunque sono composte da quark di valenza, nello specifico: due quark up, un quark down, un quark charm e un antiquark charm.

Dalle risonanze misurate non è ancora chiaro se si tratti di veri pentaquark: ovvero strutture compatte di forma sferica o leggermente deformata composte da cinque quark, legati insieme da un'interazione mediata dai gluoni. Potrebbero anche essere strutture formate dal mesone pesante J/ψ e da un barione, legati da un'interazione residua in modo simile a quello che avviene tra protoni e neutroni nei nuclei atomici, o tra atomi nelle molecole. Quindi in questa variante, come già in certe combinazioni di due mesoni, si parla anche di strutture di tipo molecolare.

Chiarire con esattezza il loro aspetto è un compito importante delle ricerche che verranno effettuate con il Large Hadron Collider del CERN di Ginevra. Sebbene ancora oggi gli sperimentatori siano molto lontani dal misurare il cosiddetto momento di quadrupolo degli stati di pentaquark (un parametro che permetterà di descrivere la deformazione spaziale), lo hanno già in mente come possibile obiettivo.

In assenza di una teoria attendibile per le interazioni nei sistemi multiquark, oggi gli scienziati possono solo speculare sul perché esista uno stato dei pentaquark charmonio, mentre forse non esistono pentaquark formati da quark più leggeri, come ha rivelato la storia tormentata della loro scoperta. Probabilmente per la formazione di sistemi multiquark sono necessari quark charm, relativamente pesanti e in grado di rendere possibile un legame più forte. [Nel luglio 2017 la collaborazione LHCb ha annunciato la scoperta di un barione composto da un quark up e due quark charm, chiamato Xi_{cc}^{++}, con massa quattro volte quella del protone, N.d.R.]

Dunque, l'accoppiamento dei quark non sarebbe universale come invece descrive la cromodinamica quantistica, ovvero lo stesso per ogni tipo di quark, ma potrebbe dipendere dalla massa dei quark di valenza: un esito che potrebbe avere conseguenze sulla formulazione matematica della cromodinamica quantistica.

Analogamente, in futuro dovrebbe essere concepibile anche trovare pentaquark con i quark bottom, ancora più pesanti. Forse questo obiettivo potrebbe essere raggiunto già con il run 2 di LHC, durante il quale i ricercatori vogliono raccogliere tre volte più dati sulle risonanze dei pentaquark e analizzarle entro il 2018. Ma verranno cercati anche pentaquark con un solo quark pesante, charm o bottom. Ulteriori scoperte sulla natura dei pentaquark potrebbero inoltre arrivare dallo statunitense Jefferson National Laboratory, in particolare da esperimenti progettati per generare risonanze in collisioni tra fotoni e protoni.

Per capire meglio la cromodinamica quantistica, in futuro saranno necessari solidi risultati su tetraquark e pentaquark. Le nuove scoperte della Collaborazione LHCb rappresentano quindi un importante passo avanti verso una comprensione più esatta dell'interazione forte. ■

PER APPROFONDIRE

Observation of J/Psi-p-Resonances Consistent with Pentaquark State. Aaij R. e altri (Collaborazione LHCb), in «Physical Review Letters», Vol. 115, 072001, 12 agosto 2015.

LHCb Reports Observation of Pentaquarks. In, «CERN Courier», pubblicato on line, 26 agosto 2015. **http://cerncourier.com/cws/article/cern/62177.**

LHCb Unveils New Particles. Pandolfi S., in «CERN Updates», pubblicato on line, 1 luglio 2016. **https://home.cern/about/updates/2016/07/lhcb-unveils-new-particles.**

Observation of the Doubly Charmed Baryon Ξ_{cc}^{++}. Aaij R. e altri (Collaborazione LHCb), in «Physical Review Letters», Vol. 119, 112001, 11 settembre 2017.

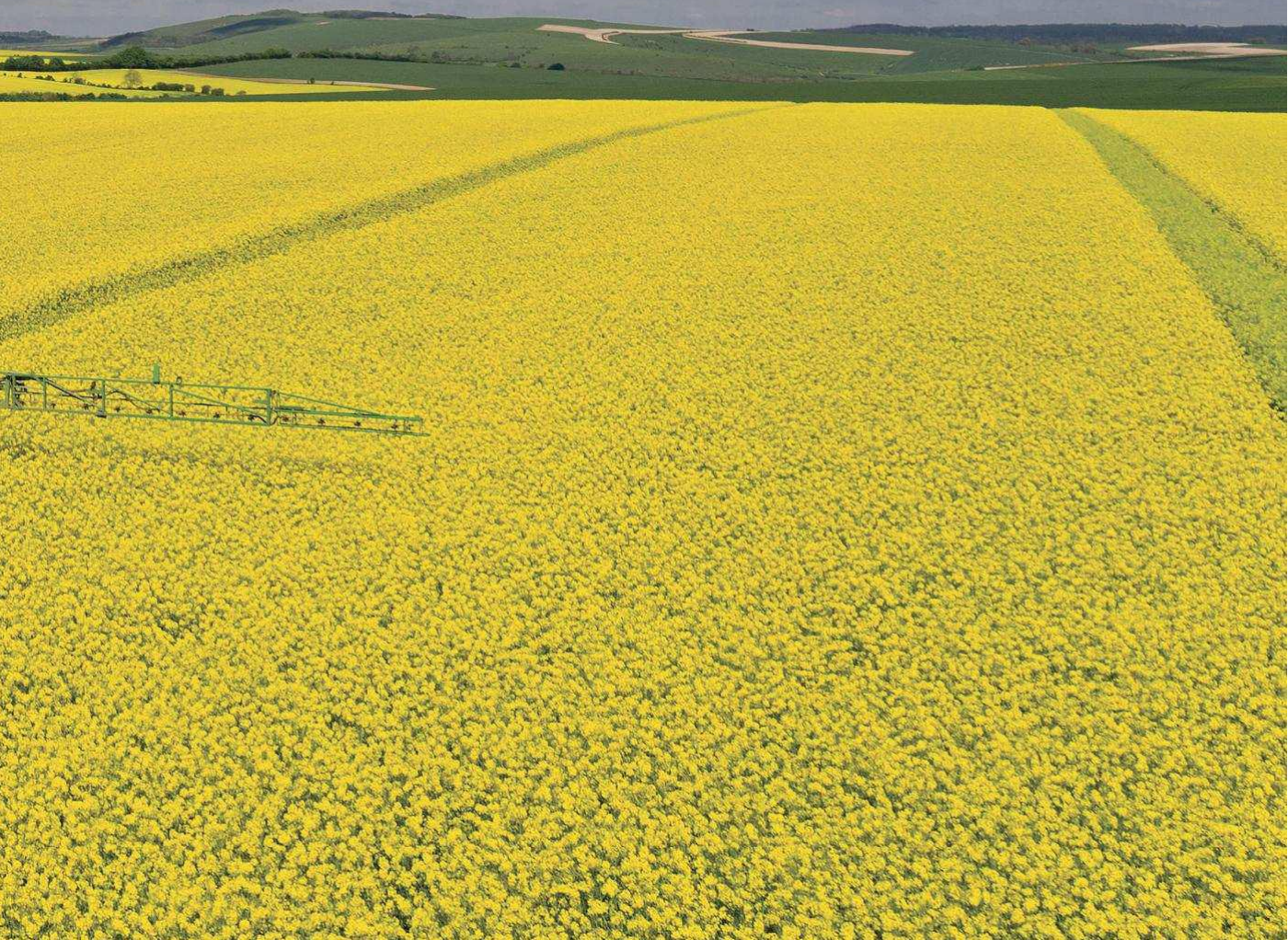
TOSSICOLOGIA

Tutto sul glifosato

di Donatello Sandroni

L'inserimento dell'erbicida più usato al mondo nella categoria delle sostanze probabili cancerogene ha scatenato reazioni pubbliche e un dibattito tra scienziati alimentato da scandali e rivelazioni

Dopo mesi di accese discussioni, il 27 novembre 2017 l'Europa ha tracciato il destino del glifosato, l'erbicida più usato al mondo. Il rinnovo all'uso per ulteriori cinque anni è di fatto un compromesso fra i paesi che ne chiedevano il bando e quelli che ne sostenevano l'approvazione per l'usuale durata di 15 anni, periodo dopo il quale le molecole vanno riviste alla luce di nuovi studi tossicologici e ambientali. Questo implica che se una molecola continua ad avere le carte in regola, in teoria può essere rinnovata in eterno.

I colori della colza. Trattamento con agrofarmaci di un campo di colza, una delle principali fonti di oli vegetali e di biodiesel.

Su questa autorizzazione di durata più breve la Commissione Europea ha quindi raggiunto la cosiddetta maggioranza qualificata, vale a dire 16 Stati membri favorevoli per un numero di abitanti superiore al 65 per cento del totale della popolazione europea. Per il «no» sono rimasti Austria, Belgio, Francia, Grecia, Croazia, Italia, Cipro, Lussemburgo e Malta, più un solo astenuto, il Portogallo. Determinante e comprensibile il «sì» della Germania, essendo il paese *rapporteur* per glifosato, ovvero il membro dell'Unione Europea delegato dall'Autorità europea per la sicurezza alimentare (EFSA) a valutarne il rinnovo dal punto di vista scientifico. Questo lavoro è stato effettuato dall'Istituto federale tedesco per la valutazione dei rischi (BFR), trovando parere tecnico positivo.

Ora vi saranno altri cinque anni in cui molti nodi potranno essere sciolti, effettuando nuovi studi come pure andando a fondo di vicende che poco hanno a che fare con la scienza, sembrando più che altro una sorta di *spy story*. Trattasi dei vari *paper* che hanno coinvolto prima Monsanto, allargandosi poi al *panel* stesso dell'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC), la costola dell'Organizzazione mondiale della Sanità (OMS) che ha prodotto la monografia numero 112 sul glifosato. Quella che ha collocato l'erbicida nel gruppo 2A, «probabili cancerogeni per l'uomo», dando la stura a ogni evento successivo, inclusa la *class action* contro Monsanto negli Stati Uniti.

Una lunga storia

La molecola del glifosato ha una lunga storia dal punto di vista chimico, considerato che è stata sintetizzata per la prima volta nel 1950 da Henri Martin di Cilag AG, un'azienda farmaceutica svizzera. In seguito, al termine di una complessa serie di passaggi societari, arrivò a Monsanto, la quale ne appurò le proprietà erbicide e ne iniziò la sintesi nel 1970. L'erbicida venne in seguito formulato sotto forma di differenti sali e commercializzato con lo storico marchio Roundup, ancora oggi usato impropriamente come sinonimo di glifosato. Oggi la molecola è autorizzata in quasi 130 paesi tramite centinaia di registrazioni, ma la protezione brevettuale è terminata nel 2001, dando vita a un consistente numero di «generici».

Dal punto di vista molecolare, glifosato ha una struttura analoga alla glicina, un amminoacido. Una volta giunto a bersaglio blocca la produzione di alcuni altri amminoacidi, per esempio il triptofano o la fenilalanina, inibendo un enzima (la 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintetasi) presente solo nel regno vegetale e nei batteri. Da questa proprietà deriva sia l'efficacia del glifosato su ogni tipo di pianta, tranne gli OGM opportunamente modificati per resistergli, sia il suo profilo tossicologico favorevole per i mammiferi. Il punto di forza che rende il glifosato unico rispetto ad altri erbicidi totali risiede nell'effetto sistemico sulle piante, che gli permette di devitalizzarne anche le radici: può diffondere facilmente lungo i vasi linfatici delle infestanti fino a raggiungerne e bloccarne gli apici di accrescimento.

Economico e risolutivo in molti campi di applicazione, il glifosato permette per esempio di mantenere puliti i filari di frutteti e vigneti, eliminando la competizione delle piante infestanti verso le colture. Questo erbicida sembra inoltre fondamentale quando è applicato in pre-semina nelle pratiche di agricoltura conservativa, per esempio la semina su sodo: questa tecnica permette di porre a dimora i semi eliminando ogni tipo di lavorazione meccanica tradizionale, come arature ed erpicature. Le prime rivoltano lo strato superficiale di terreno, mentre le seconde lo affinano per renderlo seminabile. Eliminarle va quindi a vantaggio dell'equilibrio dei suoli e dei contenuti di sostanza organica, ovvero quella componente del terreno che aumenta fertilità, biodiversità, stabilità strutturale e capacità di trattenere acqua.

Grazie alla pratica di semina su sodo, la sostanza organica può aumentare fino al 63 per cento, contribuendo così alla difesa del terreno dall'erosione dovuta a vento e piogge, vero flagello soprattutto in aree collinari. Non ultimo, si ottiene anche il drastico abbattimento dei consumi complessivi di gasolio. Un aspetto di grande importanza, questo, visto che il carbonio contenuto in un chilogrammo di gasolio è sufficiente a produrne tre di anidride carbonica, gas responsabile del riscaldamento globale. Infine, ol-

Donatello Sandroni, giornalista e divulgatore tecnico-scientifico, è laureato in scienze agrarie e dottore di ricerca in chimica, biochimica ed ecologia degli antiparassitari. È socio del mensile «Macchine Trattori» e collabora con il magazine on line «Agronotizie.it» in tema di agrochimica.

Ian Lishman/AGF (*pagine precedenti*)

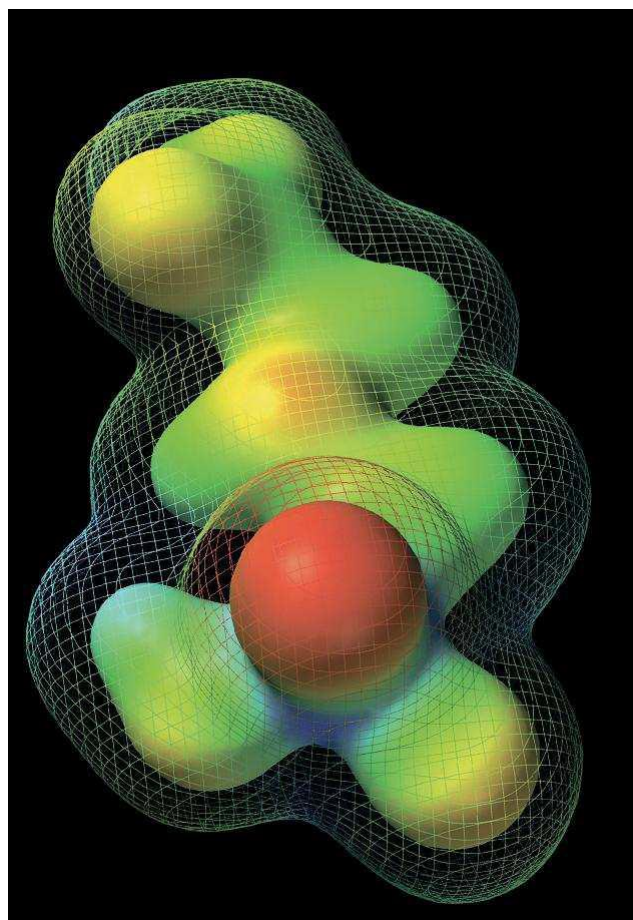
IN BREVE

Un recente rapporto dell'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) dell'Organizzazione mondiale della Sanità ha inserito il glifosato, l'erbicida più usato al mondo, nella categoria dei «probabili cancerogeni per l'uomo».

Questa conclusione ha scatenato reazioni pubbliche senza precedenti, tra cui una class action contro Monsanto, produttrice di un erbicida basato su glifosato.

Ma le principali agenzie pubbliche che si occupano di tossicologia sono arrivate a una conclusione opposta. Inoltre, scandali e rivelazioni che hanno riguardato la stesura del rapporto suggerirebbero un nuovo processo di valutazione da parte dell'IARC.

Dal laboratorio al campo. Sotto, coltivazioni negli Stati Uniti di differenti varietà di soia, tra le quali una è stata geneticamente modificata in modo da resistere all'erbicida Roundup di Monsanto, il cui principio attivo è il glifosato; accanto, la struttura della molecola di glifosato (qui in un'elaborazione al computer), che è un derivato fosfonico della glicina, un amminoacido.

Jim West/Science Photo Library/AGF (*campo*); Alfred Pasieka/Science Photo Library/AGF (*molecola glifosato*)

tre agli usi agricoli il glifosato trova impiego nella pulizia delle reti ferroviarie e dei bordi stradali. Nel 2016 è stato invece escluso dalla gestione delle aree urbane, sempre a causa dell'inserimento nel gruppo 2A dello IARC.

Meno di limoni e caffè

Per esprimere la tossicità acuta di una sostanza si ricorre alla dose letale per il 50 per cento delle cavie (indicata con la sigla DL50) in appositi test, espressa in milligrammi per chilogrammo di peso corporeo. Più alto è questo parametro, meno è tossica la molecola. Sui ratti il glifosato mostra una DL50 di 5600 milligrammi per chilogrammo. A titolo esemplificativo, significa che un essere umano di 70 chilogrammi avrebbe il 50 per cento di probabilità di morire se ingerisse 392 grammi di glifosato in una volta sola.

Questo pone il glifosato fra le molecole meno tossiche con cui si possa entrare in contatto. Vi sono sostanze naturali più tossiche, per esempio l'acido citrico degli agrumi, con una DL50 di 3000 milligrammi per chilogrammo, e i limoni lo contengono in concentrazioni tra 50 e 70 grammi per chilogrammo. Peggio ancora per la caffeina, contenuta in una razione media di caffè in ragione di 100 milligrammi e letale a soli 367 milligrammi per chilogrammo. Ma nessuno teme qualche goccia di limone come condimento, né si preoccupa per una tazzina di caffè, dato che per raggiungere la dose letale per un essere umano di 70 chilogrammi servirebbero dai 3 ai 4 chilogrammi di limoni e 250 tazzine circa di espresso. Esperimenti che si sconsiglia di provare a casa.

Più tossici del glifosato sono poi alcuni medicinali di largo impiego, come ibuprofene e acido acetilsalicilico, la comune aspirina, i quali nella letteratura scientifica mostrano valori di DL50 rispettivamente di 495 e 200 milligrammi per chilogrammo. Ovvero 11 e 28 volte più tossici del glifosato. Questo però non deve dissuadere dal loro uso, perché l'assunzione è limitata nel tempo e le posologie massime dei due medicinali si posizionano rispettivamente 29 e 12 volte al di sotto delle dosi letali appena riportate. Anche alcune sostanze usate in agricoltura biologica, come il rame, hanno tossicità acute superiori. Il solfato di rame pentaidrato, per esempio, mostra una DL50 di 300 milligrammi per chilogrammo, ovvero è 19 volte più tossico del glifosato.

Una questione di esposizione

Nel marzo 2015 la classificazione del glifosato come probabile cancerogeno da parte della IARC ha scatenato reazioni mediatiche e politiche senza precedenti. Di parere opposto alla IARC sono state le principali agenzie mondiali, a partire da EFSA, con uno studio di Jose V. Tarazona, BFR e Agenzia europea per le sostanze chimiche, proseguendo con la statunitense Environmental Protection Agency (EPA), i gruppi congiunti di lavoro di OMS e FAO, Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority, Environmental Protection Authority neozelandese, Pest Management Regulatory Agency canadese e Ufficio federale dell'agricoltura elvetico.

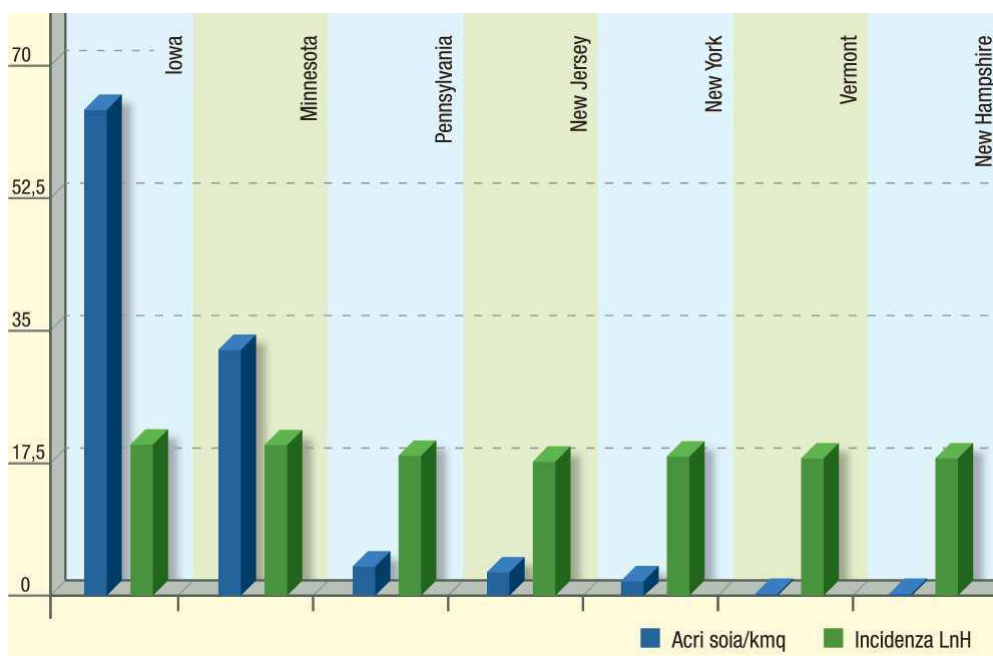
Ognuna di queste agenzie ha valutato il glifosato in funzione dei reali livelli di esposizione per l'essere umano, trovando quei valori sicuri per la salute. L'IARC, infatti, non contempla questi aspetti, classificando le molecole solo in base alle potenzialità intrinseche di causare il cancro. Per esempio, nel gruppo 2A rientrano anche acqua al di sopra dei 65 gradi e carne rossa. In sostanza, la

Correlazione assente. Confronto fra densità di coltivazione di soia OGM (acri per chilometro quadrato: un acro equivale a 0,4 ettari) trattata più volte con glifosato, e incidenza di linfomi non-Hodgkin (LnH), ovvero numero di casi su 100.000 individui nei sette Stati degli Stati Uniti in cui questi tumori risultano più frequenti. Non emerge alcuna correlazione fra LnH e binomio OGM-glifosato.

Grafico Danilo Sossi su indicazione dell'autore; fonte dati: American Cancer Society, United States Department of Agriculture

IARC si focalizza sulle molecole, indipendentemente dalle dosi e dai livelli di esposizione reali, mentre le altre agenzie si concentrano proprio sui rischi per l'essere umano, concludendo che il glifosato non può essere considerato un probabile cancerogeno.

Quanto siamo esposti

L'esposizione umana al glifosato si verifica fondamentalmente attraverso le acque e i residui in alcuni cibi e bevande, come pasta o birra, essendo ricavata anch'essa dai cereali. Oltreoceano, i cereali sono trattati in pre-raccolta con l'erbicida per uniformarne il disseccamento ed essendo importati per colmare i deficit produttivi italiani vanno poi a comporre una quota importante di quanto glifosato viene ingerito nel nostro paese.

Circa le acque profonde, dai rapporti dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale (ISPRA), il valore massimo riscontrato fra il 2009 e il 2014 è stato pari a 1,08 microgrammi (ovvero milionesimi di grammo) per litro, mentre nella quasi totalità degli altri campioni considerati o il glifosato era assente, o era presente nell'ordine dei nanogrammi (miliardesimi di grammo). Per rendere l'idea, 1 microgrammo per litro è circa pari a due gocce fatte cadere in una piscina olimpionica. Questo valore è comunque dieci volte superiore al limite di legge italiano per le acque potabili. Un limite, è bene dirlo, fissato per via normativa, avulso cioè da valutazioni sulla pericolosità. Infatti è uguale per tutte le molecole indipendentemente dal loro profilo tossicologico. Negli Stati Uniti questo limite è invece individuato molecola per molecola partendo dagli specifici ADI, acronimo di *admissible daily intake*, o dosi ammissibili giornaliere. Queste sono a loro volta ricavate dividendo per 100 la dose che in laboratorio è risultata già di per sé innocua sulle cavie, ovvero la No Effect Level (NoEL, in italiano «la dose di nessun effetto»).

Seguendo questo percorso, negli Stati Uniti il limite considerato sicuro per il glifosato nelle acque potabili è stato fissato a 700 microgrammi per litro: 7000 volte quello italiano. L'ADI del glifosato è infatti 0,5 milligrammi al giorno per chilogrammo di peso corporeo. Un essere umano di 70 chilogrammi può cioè ingerire, restando nei margini di sicurezza, fino a 35 milligrammi al giorno di glifosato, pari a quasi 13 grammi all'anno. Tramite l'acqua, pur adottando il picco massimo di 1,08 microgrammi per litro già citato, l'esposizione al glifosato può essere stimata nel peggiore dei casi in 790 microgrammi all'anno, assumendo l'ingestione di due litri di acqua al giorno per tutti i 365 giorni del calendario. Questo valore complessivo è dunque di poco superiore a quello che negli Stati Uniti è considerato sicuro in un solo litro di acqua.

Da analisi su pasta e birra sono stati rilevati rispettivamente valori massimi di 0,33 milligrammi per chilogrammo, 30 volte inferiori ai limiti di legge per il glifosato sul grano, e 29,7 microgrammi per litro. Considerando i consumi medi annui di pasta e di birra, pari a 26 chilogrammi e a 31 litri, anche scegliendo solo i marchi a maggiori concentrazioni di glifosato un italiano assorbirebbe in totale 8,5 milligrammi con la pasta e meno di un milligrammo con la birra. Addirittura in questi casi limite l'ingestione complessiva annua resterebbe dell'ordine di pochi milligrammi, cioè migliaia di volte al di sotto della soglia di sicurezza tossicologica. Milioni, in tutti gli altri casi.

Un dato confermato da Paul J. Mills, dell'Università della California a San Diego, in uno studio pubblicato nel 2017 sul «Journal of the American Medical Association». La ricerca ha riguardato le urine ed è stata condotta negli Stati Uniti su 1000 individui adulti, dai quali in 23 anni di monitoraggi si è rilevato un valore massimo di 0,547 microgrammi di glifosato per litro di urina. Sapendo che l'escrezione di glifosato avviene per circa un terzo via urina e la rimanente quota è espulsa intatta con le feci, significa che perfino l'individuo con escrezioni maggiori ha ingerito glifosato in ragione di un solo milligrammo all'anno. Infatti il glifosato è espulso tal quale dal corpo in ragione di oltre il 99 per cento della dose ingerita, mentre una minima parte viene trasformata in un suo metabolita, escreto sempre con le urine.

Questo valore annuo può anche essere tradotto in dose giornaliera per chilogrammo di peso corporeo (stabilito in 70 chilogrammi), ovvero 40 nanogrammi per chilogrammo al giorno. Un dato 25 milioni di volte inferiore alla dose che nelle cavie ha fatto rilevare un aumento dell'incidenza tumorale. Solo alla dose di 1000 milligrammi per chilogrammo al giorno, somministrati per due

Esposizione decrescente. Concentrazione (microgrammi per litro) di glifosato nelle acque superficiali In Italia (per esempio fiumi e canali): valori relativi al novantancinquesimo percentile, ovvero il dato al di sotto del quale si trova il 95 per cento delle concentrazioni misurate. L'andamento appare in calo, con un leggero rialzo nel 2014 dovuto in parte alle forti piogge cadute in primavera ed estate.

Grafico Danilo Sossi su indicazione dell'autore; fonte dati Report biennali ISPRA, anni 2012, 2014 e 2016

anni, cioè circa la metà della vita dei roditori, si sarebbe registrata un'incidenza di emangiosarcomi, una neoplasia maligna che ha origine dal tessuto che riveste la superficie interna dei vasi e del cuore, dell'8 per cento nei maschi e del 2 per cento nelle femmine.

Scandali e sospetti

A rendere aspro lo scontro sul glifosato sono giunti infine quattro differenti *paper*, indagini che vanno dall'imbarazzante all'inquietante sia su Monsanto sia su persone coinvolte dalla IARC nella valutazione della molecola. Quando la Corte federale di San Francisco ha desecretato gli atti relativi alle cause contro Monsanto sarebbero emersi contatti fra l'azienda e Jess Rowland, ex vicedirettore dell'ufficio per gli agrofarmaci dell'EPA, oggi in pensione. Rowland è sospettato di aver influito sulla revisione di studi. A metterlo nei guai, e con lui Monsanto, è stata una frase: «*If I can kill this, I should get a medal*» («se ammazzo questo – studio, N.d.A. – merito una medaglia», estratta da una sua e-mail inviata a Dan Jenkins, *regulatory affairs manager* di Monsanto, e riferita a uno studio contrario al glifosato. Monsanto sarebbe inoltre stata accusata di essere la vera autrice di studi innocentisti, come quello pubblicato dal patologo del New York Medical College Gary Williams nel 2000 su «Regulatory Toxicology and Pharmacology».

Non si erano però ancora placate le polemiche sui «Monsanto paper» che già si affacciavano sulla scena i «Blair paper». Aaron Blair è un epidemiologo dello US National Cancer Institute, ed è stato *chairman* del gruppo IARC che ha valutato glifosato. A monografia pubblicata, Blair ha ammesso in tribunale l'esistenza di uno studio sul glifosato rimasto nei suoi cassetti, e pubblicato solo a fine 2017. Si tratta di uno studio su oltre 50.000 individui, da cui non emergerebbe alcuna correlazione fra glifosato e diversi tipi di tumore, linfoma non-Hodgkin incluso, quello che per la IARC avrebbe invece collocato il glifosato fra i «probabili cancerogeni». A seguire, sono giunti i «Portier paper». Christopher Portier è stato presidente della commissione IARC che nel 2014 ha reso prioritaria l'indagine sul glifosato. Si è scoperto che Portier era attivista dell'Environmental Defense Fund, associazione ecologista anti–pesticidi statunitense, e aveva firmato un contratto di consulenza da 160.000 dollari con Weitz & Luxenberg, lo studio legale che elaborava la class action contro Monsanto. Il tutto nella medesima settimana in cui è stata pubblicata la monografia IARC.

Anche gli Stati Uniti si sono interessati al glifosato, aprendo la via ai cosiddetti «IARC paper» tramite il Committee on Science, Space and Technology del Senato, che ha spedito una lettera a Christopher Wild, direttore della IARC, per chiedere spiegazioni su opacità ravvisate nell'operato dell'agenzia. In un passaggio si evince che «il gruppo di lavoro [del Committee, N.d.A.] non è stato in grado di valutare questo studio a causa dei limitati dati sperimentali forniti nell'articolo di revisione e dalle informazioni aggiuntive. Anche gli studi che chiaramente conclusero "il glifosato non è cancerogeno" sono stati citati come "sufficiente" prova di glifosato come cancerogeno negli animali. Nel capitolo di dieci pagine sugli studi sugli animali, ci sono dieci cambiamenti significativi quando si confronta la monografia finale IARC e la versione di progetto. Questo capitolo di studi sugli animali è l'unica parte della valutazione del glifosato che è stata studiata. Il resto delle 92 pagine del *report* è coperto da un ordine di riservatezza. Il Comitato si chiede quanti cambiamenti significativi ed eliminazioni appaiano nelle altre pagine».

Una domanda che diventa ogni giorno più imbarazzante, soprattutto a fronte del silenzio della IARC, che si è rifiutata di rispondere. Forse sarebbe bene se la monografia fosse riaperta, aggiornata e rivalutata da persone diverse da quelle coinvolte nel processo precedente. Un atto chiarificatore di estremo coraggio che si teme però nessuno si assumerà la responsabilità di compiere. ■

PER APPROFONDIRE

Glyphosate Toxicity and Carcinogenicity: a Review of the Scientific Basis of the European Union Assessment and Its Differences with IARC. Tarazona J.V. e altri, in «Archives of Toxicology», Vol. 91, n. 8, pp. 2723-2743, agosto 2017.

Excretion of the Herbicide Glyphosate in Older Adults Between 1993 and 2016. Mills P.J., Kania-Korwel I., Fagan J. e altri, in «Journal of the American Medical Association», Vol. 318, n. 16, pp. 1610-1611, 2017.

La monografia numero 112 sul glifosato pubblicata dalla IARC: **http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol112/.**

Illustrazione di Katie Edwards

ARCHEOLOGIA

Come i prigionieri hanno cambiato il mondo

I prigionieri di guerra, soprattutto donne e bambini, sono stati uno dei motori trainanti dell'evoluzione della società moderna

di Catherine M. Cameron

Nell'estate del 2014, mentre attraversavano la Siria e l'Iraq settentrionale, i soldati delle forze dell'ISIS invasero i villaggi degli yazidi, che consideravano infedeli, uccidendo gli uomini e catturando donne e bambine. Ragazze di appena 12 anni diventarono «mogli», cioè schiave sessuali che erano fatte circolare tra i combattenti dell'ISIS.

IN BREVE

Nonostante le piccole società tribali siano spesso rappresentate come comunità di persone che si consideravano pari tra loro, in realtà nella maggior parte dei casi comprendevano un certo numero di individui marginalizzati, molti dei quali erano prigionieri che provenivano da altri gruppi.

La storia mondiale ha ignorato a lungo la vita di questi schiavi, ma esaminando i resoconti dei primi viaggiatori e altri racconti si scopre che invece ebbero una profonda influenza sulle società di chi li aveva catturati, testimoniata anche da reperti archeologici.

I prigionieri creavano potere e ricchezza, fattori che contribuirono a gettare le basi per un'importantissima transizione a livello sociale: l'evoluzione delle società statali più complesse.

Era un orrore fin troppo noto: l'incubo vissuto dalle donne yazide è lo stesso di tutte le prigioniere nel corso dei secoli.

Da oltre dieci anni studio la cattura di prigionieri nelle culture antiche e storiche. Sono un'archeologa, e sono particolarmente interessata ai processi sociali e demografici nelle società di piccole dimensioni che gli studiosi chiamano «tribù» o «clan»: gruppi di meno di 20.000 individui legati da vincoli di parentela o di matrimonio e i cui capi hanno un potere relativamente limitato. In queste società i prigionieri di guerra erano onnipresenti: resoconti di antichi viaggiatori, documenti etnostorici, descrizioni etnografiche, racconti di prigionieri e rapporti archeologici ci raccontano della presenza di schiavi in tutti gli angoli del mondo, dall'Europa settentrionale alla punta del Sud America. Le mie analisi di questi documenti sono il primo tentativo di un esame transculturale della cattura di prigionieri e delle sue conseguenze.

I mondi descritti in queste testimonianze sono in netto contrasto con l'immagine idealizzata di piccole comunità di persone che si trattavano da pari. Al contrario, la maggior parte di queste società comprendeva un certo numero di persone che non avevano accesso alle stesse risorse e agli stessi vantaggi degli altri membri del gruppo. Alcuni di questi individui erano orfani, disabili o criminali, ma per la maggior parte si trattava di prigionieri provenienti da altri gruppi. Addirittura, in alcune società tribali gli individui che entravano nel gruppo con la cattura potevano costituire fino al 25 per cento della popolazione. Poiché non avevano parenti nella comunità, di cui si erano trovati a far parte contro la loro volontà, erano automaticamente marginalizzati; in molti casi non erano nemmeno considerati umani.

Ma, pur formando lo strato sociale più basso della società in cui erano entrati, i prigionieri la influenzavano in modi profondi. Mettevano in contatto i loro rapitori con idee e credenze nuove provenienti dal loro gruppo d'origine, favorendo così la diffusione di tecnologie e ideologie. E avevano un ruolo chiave nella creazione di status, disuguaglianze e ricchezza nei gruppi che li avevano catturati. Questi fattori potrebbero essere alla base dell'emergere di una struttura sociale molto più sofisticata: la società statale, nella quale una persona o un gruppetto di persone detiene un potere e un'autorità significativi su una popolazione che supera i 20.000 individui e in cui l'appartenenza non è determinata da rapporti di parentela ma dalla classe sociale o dalla residenza all'interno dei confini della nazione-Stato. Con tutte le miserie che hanno sopportato, i prigionieri hanno cambiato il mondo.

Presi con la forza

In genere si diventava prigionieri nel corso di una guerra o di un'incursione. Nel suo primo viaggio in America nel 1492, Cristoforo Colombo sentì parlare dei feroci Kalinago, che abitavano le isole caraibiche delle Piccole Antille. Documenti del XV e del XVI secolo rivelano che si spostavano per centinaia di chilometri con le loro canoe da guerra per attaccare altre isole e depredarle di beni e abitanti. Al ritorno, i guerrieri uccidevano ritualmente i maschi adulti catturati. I ragazzi erano castrati e usati come schiavi finché non diventavano adulti e venivano sacrificati mentre le donne giovani entravano nella società kalinago come concubine del guerriero che le aveva catturate o come serve di sua moglie.

Le tribù di cacciatori-raccoglitori che abitavano la costa pacifica del Nord America facevano incursioni per catturare prigionieri da usare come schiavi o per scambiarli con altri beni. Resoconti del XIX secolo descrivono flotte di canoe da guerra cariche di guerrieri che attaccavano i gruppi confinanti o facevano incursioni a più ampio raggio e catturavano principalmente donne e bambini, ma anche gli uomini che non erano morti in battaglia. Tra l'VIII e l'XI secolo, i Vichinghi razziarono per tutto il nord Atlantico e il Mediterraneo, catturando numeri enormi di prigionieri da vendere o da usare come schiavi. Nelle Filippine, tra il XII e il XVI secolo, i clan costieri inviavano flotte di combattenti in tutta la regione per attaccare i gruppi più piccoli e catturare schiavi. Secondo l'archeologa Laura Junker, dell'Università dell'Illinois a Chicago, quei guerrieri tornavano con prigioniere che tenevano come schiave o come mogli, e che poi lavoravano nei campi o producevano vasellame e tessuti che il padrone avrebbe venduto.

Raramente i prigionieri raggiungevano uno status di parità con chi faceva parte di quella società dalla nascita. Quando i guerrieri tornavano a casa, i prigionieri destinati a diventare schiavi subivano quasi sempre un processo che il sociologo Orlando Patterson, della Harvard University, chiama «morte sociale», con il quale erano privati della loro identità originale e «rinascevano» come schiavi. Come parte di questo processo, spesso erano obbligati ad adottare un marchio visibile della loro schiavitù e ricevevano un nuovo nome «da schiavo». Per esempio i Conibo del Perù orientale tagliavano i capelli alle prigioniere, lasciandole con una corta frangia che ne segnalava la condizione di schiave. I prigionieri erano anche obbligati a cambiare il loro abbigliamento tradizionale, che a loro sembrava indecente e selvaggio. I Kalinago picchiavano e insultavano i nuovi prigionieri, tagliavano loro i capelli per indicare la condizione di schiavitù e li ribattezzavano «schiava» o «schiavo» a seconda del genere; i maschi giovani, dato che alla fine erano sacrificati e mangiati, erano anche chiamati «il mio arrosto».

Resoconti del primo Ottocento descrivono la distruzione traumatica dell'identità sociale e culturale di alcuni prigionieri nel Sudest asiatico, tra cui un capitano olandese catturato dagli Iranun delle Filippine, che fu spogliato e legato mani e piedi sul fondo di una barca. Secondo l'etnostorico James Warren, della Murdoch University, in Australia, i pirati colpivano i prigionieri sui gomiti e sulle ginocchia per impedire loro di fuggire a piedi o a nuoto. Legati per mesi, poco nutriti e continuamente sottoposti ad abusi, alla fine i prigionieri abbandonavano ogni speranza di fuga.

Nelle società della costa pacifica del Nord America, i prigionieri che diventavano schiavi non solo non avevano alcuna possibilità di diventare membri a pieno titolo della società dei loro catturato-

Catherine M. Cameron è archeologa dell'Università del Colorado a Boulder. Studia in particolare i siti nel sud-est degli Stati Uniti, come il Chaco Canyon, e da 12 anni si occupa dei prigionieri nelle piccole società tribali in tutto il mondo.

Nelle piccole società tribali, in genere i prigionieri dovevano lavorare come schiavi, come si vede in una scultura della costa pacifica del Nord America (1). Alcune donne venivano prese in moglie, come avvenne a Helena Valero, catturata dagli Yanomami in Amazzonia negli anni trenta del Novecento (2). L'influenza dei prigionieri sui gruppi di cui entravano a far parte è visibile in artefatti come una maschera irochese per un rito di guarigione che forse fu introdotto dai prigionieri uroni (3).

1

2

3

Museum of Anthropology, University of British columbia (1); Jose Antonio Carrera Muñoz (2); Werner Forman/Getty Images (3)

ri, ma lo stesso destino si trasmetteva ai loro figli, come accadeva agli schiavi africani negli Stati sudisti degli Stati Uniti o a quelli dell'antica Roma.

Agenti del cambiamento

Si potrebbe pensare che prigionieri maltrattati e portati a forza in una società avessero poche occasioni di trasmettere le proprie conoscenze o capacità a chi li aveva catturati. Invece il mio studio transculturale mostra un'immagine diversa. Oggi si tende a vedere le piccole società tribali come immutabili e fuori dal tempo, ma in realtà erano spesso interessate a imparare cose nuove. I prigionieri portavano con sé opportunità di crescita sociale, economica e ideologica che i loro catturatori sfruttarono fino in fondo.

Vari resoconti indicano che almeno alcuni dei prigionieri erano cercati specificamente per le loro conoscenze tecnologiche. L'armaiolo inglese John Jewitt, catturato all'inizio del XIX secolo dai Mowachaht, una tribù della costa pacifica del Nord America, fu risparmiato durante l'attacco che uccise i suoi compagni perché il capotribù voleva le armi di metallo che era in grado di produrre. Jewitt, che raccontò in dettaglio le sue disavventure in un'autobiografia pubblicata nel 1815, mostrò ai suoi rapitori anche come lavare gli abiti sporchi invece di gettarli via, anche se poi fu egli stesso a doversene occupare.

Helena Valero, catturata dagli Yanomami dell'Amazzonia intorno al 1930, quando aveva 12 anni, raccontò che i suoi rapitori erano montati su tutte le furie quando aveva detto loro di non essere capace di produrre strumenti metallici. La donna raccontò i 25 anni passati in quella tribù in un libro pubblicato nel 1965, nel quale scrisse: «Le donne dissero: "È una donna bianca, deve saperlo; ma non vuole fare abiti, machete o pentole per noi; picchiatela"». Ma il vecchio capotribù e una delle altre donne la difesero, così riuscì a sopravvivere. La capacità di lavorare il metallo era molto apprezzata anche dalle tribù germaniche del nord Europa, che catturavano i fabbri romani per metterli al lavoro. Gli archeologi hanno trovato oggetti metallici di fattura romana come statuette, armi e corni potori prodotti localmente in siti settentrionali, a nord fino alla Danimarca.

I prigionieri di guerra potevano influenzare anche le pratiche religiose della società che li aveva catturati. Sulla costa pacifica del Nord America, gli Haida copiarono dai prigionieri Bella Bella i raduni cerimoniali chiamati *potlatch*, che venivano organizzati per costruire o riparare una casa. Nel XIX secolo la gente di Ouidah, un porto schiavista sulla costa dell'Africa occidentale, praticava una varietà di culti vudù che in parte erano stati introdotti dalle schiave catturate nei gruppi africani dell'interno. E le tribù germaniche che attaccarono l'impero romano all'epoca del suo declino impararono il cristianesimo dai prigionieri romani.

Sebbene in genere i rapitori disprezzassero i prigionieri, spesso credevano che avessero poteri taumaturgici. Lo spagnolo Álvar Núñez Cabeza de Vaca stava esplorando la costa del Golfo del Messico con alcuni compagni qualche decina d'anni dopo il viaggio di Colombo quando il gruppo naufragò e fu raccolto dai membri delle tribù locali in quello che oggi è il Texas. Gli indigeni erano sicuri che gli stranieri fossero in grado di guarire le malattie, e Cabeza de Vaca e i suoi divennero famosi per le cerimonie di guarigione che inventarono. Quando riuscirono a fuggire e a raggiungere il territorio dell'attuale Messico, i tanti gruppi indigeni che incontrarono lungo la strada chiesero il loro aiuto di guaritori. Parimenti, a metà del XIX secolo nel Far West un capo Oglala Sioux ferito chiese che a curarlo fosse una prigioniera, una giovane pioniera chiamata Fanny Kelly, perché credeva che il tocco di una donna bianca l'avrebbe guarito. E si ritiene che nel nord-est dell'America settentrionale siano stati alcuni prigionieri Uroni ad aver introdotto la Società dei falsi volti, i cui guaritori indossavano maschere di legno, presso gli Irochesi che li avevano catturati.

Status symbol

Forse il risultato più sorprendente della mia ricerca è la scoperta che i prigionieri erano una fonte importantissima di potere sociale e politico. Nelle piccole società tribali il potere di un leader derivava dal numero di seguaci che controllava, che per la maggior parte erano suoi parenti. Seppur involontariamente, i prigionieri aggiungevano un numero significativo di seguaci non imparentati con il leader, e di conseguenza ne elevavano lo status sociale. Gli schiavi, soprattutto le donne in età fertile, permettevano ai leader o agli uomini in cerca di un maggiore status sociale di far crescere la propria famiglia o il numero di seguaci senza dover sottostare al tradizionale obbligo matrimoniale di pagare il prezzo della sposa alla sua famiglia. Inoltre i prigionieri creavano per definizione una disuguaglianza nelle società in cui entravano: in quanto membri più marginali e disprezzati del gruppo, innalzavano lo status di tutti gli altri.

In gran parte delle società che ho esaminato, gli uomini acquistavano prestigio con il successo in guerra, e i prigionieri erano la prova migliore di una vittoria. Tra i Kalinago, per esempio, un uomo poteva stringere un matrimonio vantaggioso con una famiglia altolocata solo se trionfava in guerra, il che significava prendere prigionieri. I giovani Irochesi nel nord-est dell'America settentrionale non potevano aspirare a diventare capi o a contrarre un buon matrimonio se non erano guerrieri affermati, e ancora una volta questo era dimostrato dai prigionieri catturati. In tutta la regione gli uomini, per vantarsi dei loro successi in guerra e nella cattura di prigionieri, praticavano la «cerimonia del calumet», un rito di alleanza che consisteva nel fumare pipe sacre; durante la cerimonia ciascun guerriero narrava le battaglie a cui aveva partecipato e descriveva ognuno degli schiavi che si era guadagnato. Nei clan filippini del Sudest asiatico, tra il XII e il XVI secolo, i guerrieri che catturavano più prigionieri e ottenevano la maggior quantità di bottino nelle incursioni raggiungevano lo status più elevato.

I padroni guadagnavano status sociale anche mettendo in mostra il potere che esercitavano sui loro schiavi. La nettissima differenza nella vita quotidiana dei padroni e degli schiavi rafforzava continuamente la loro posizione rispettiva. In questo senso, un alto status sociale richiedeva non solo l'esistenza di un padrone e di uno schiavo, ma anche di un pubblico che fosse testimone della dominanza. Patterson ha notato che il culto della cavalleria nel sud degli Stati Uniti, che metteva l'accento sull'«onore» degli uomini, era possibile solo perché i bianchi potevano mettersi in contrasto con gli schiavi inermi e ai loro occhi «senza onore» (indipendentemente dal fatto che possedessero o meno degli schiavi).

Dinamiche simili avevano luogo anche nelle piccole società tribali. Per esempio, sulla costa pacifica del Nord America gli uomini importanti, detti «titolati», mettevano in luce il proprio prestigio nelle interazioni quotidiane con gli schiavi, limitandosi a svolgere esclusivamente compiti amministrativi, come l'organizzazione di eventi cerimoniali, e non facevano quasi mai lavori veri, che erano compito degli schiavi. Anche le mogli e le figlie dei titolati evitavano il lavoro: gli schiavi le seguivano ovunque e si occupavano di raccogliere la legna, prendere l'acqua, cucinare, portare pesi e badare ai bambini.

Tra i Conibo, i prigionieri potevano anche diventare valletti (servi nelle case di famiglie o di individui altolocati), cosa che aumentava ulteriormente lo status dei padroni. Ugualmente, i Makú prigionieri dei Tukano orientali del bacino del fiume Vaupés in Brasile e Colombia si occupavano dei bisogni personali del padrone e di sua moglie; secondo l'antropologo Fernando Santos-Granero, dello Smithsonian Tropical Research Institute di Panama, i Makú sorreggevano il grande sigaro cerimoniale del padrone quando questi fumava e persino allattavano i bambini della padrona, eppure i Tukano li disprezzavano. Gli uomini tukano prendevano le donne makú come concubine, ma non avrebbero mai preso in considerazione l'idea di sposarle.

Produttori di ricchezza

Alcuni ricercatori hanno sostenuto che gli schiavi delle piccole società tribali fossero solo uno status symbol senza avere un vero ruolo nell'economia e che ci fosse un netto contrasto tra la schiavitù di questo tipo e quella su larga scala, il cui impatto economico è evidente nella storia recente, per esempio negli schiavi africani che producevano la ricchezza del sud degli Stati Uniti e che furono una forza trainante dello sviluppo economico del paese nel XIX secolo.

Un campo rifugiati nel nord dell'Iraq dà asilo ad alcune donne yazide che sono riuscite a sfuggire ai rapitori dell'ISIS.

Safin Hamed/Getty Images

Ma i gruppi che ho studiato indicano che i prigionieri nelle piccole società tribali diedero effettivamente inizio a un processo di creazione di ricchezza, status sociale e disuguaglianza che prefigurava le conseguenze economiche della schiavitù su larga scala negli Stati Uniti, a Roma e altrove.

I leader dovevano premiare coloro che li seguivano volontariamente per mantenerli fedeli, perciò il loro potere era legato alla capacità di controllare e offrire cibo o beni commerciabili. Nelle piccole società tribali, in genere un aspirante leader si rivolgeva ai parenti per creare l'eccesso di beni di cui aveva bisogno per attirare e tenere con sé e seguaci, ma i parenti potevano rifiutarsi. I prigionieri inermi, invece, non avevano questa possibilità.

Nella letteratura ci sono numerosi esempi dell'impatto economico dei prigionieri nelle società precoloniali. Consideriamo per esempio i clan che abitavano la Valle di Cauca, in Colombia, nel XVI secolo e che erano costantemente in guerra tra loro. I primi visitatori spagnoli, soldati e preti, riferiscono che i vincitori facevano centinaia di prigionieri; ne sacrificavano alcuni, ma ne tenevano molti altri come schiavi, il che permetteva a ciascun padrone di aumentare significativamente la propria produzione agricola.

Sulla costa pacifica del Nord America il salmone era un elemento di base nell'alimentazione di molti gruppi, ma era disponibile solo in certi periodi dell'anno, perciò era necessario essiccarlo perché non si rovinasse. Le tribù consideravano la preparazione del salmone un lavoro da donne, ma erano pronti ad affidarla a schiavi di entrambi i sessi, creando così un surplus di salmone essiccato. In un'altra area del Nord America, quella delle Grandi Pianure, nel secolo precedente all'arrivo degli europei gli uomini diventavano ricchi con la produzione e il commercio di pelli e pellicce di bisonte, simbolo di un alto status sociale, e la produzione di queste pelli e pellicce era un lavoro duro che veniva affidato alle donne. Judith Habicht-Mauche, archeologa dell'Università della California a Santa Cruz, ha trovato prove del fatto che gli uomini delle pianure catturavano donne dai villaggi dei Pueblo per avere più mogli: i resti di vasellame prodotto nelle Grandi Pianure con tecniche associate alla cultura dei Pueblo permettono di seguire lo spostamento delle donne Pueblo nelle tribù delle pianure. Secondo Habicht-Mauche il lavoro comune di tante mogli poteva raddoppiare la produzione di pelli e aumentare significativamente la ricchezza e lo stato sociale di un uomo.

Le risorse generate dai prigionieri permettevano ai capi e agli aspiranti leader di evitare gli obblighi di reciprocità con i parenti e di consolidare il proprio potere sociale ed economico. Nelle Filippine, le prigioniere producevano cibo, articoli tessili e vasella-

me. I capi usavano i beni in eccesso per finanziare banchetti con cui convincevano i guerrieri a seguirli e a lottare per loro, aumentando così le dimensioni dei propri eserciti, mentre gli aspiranti capi commerciavano i beni in tutto il Sudest asiatico per arricchirsi. I Conibo in Perù avevano un metodo simile per trasformare in potere e status sociale il surplus di ricchezza prodotto dai prigionieri: la «festa concorrenziale».

Secondo l'archeologo Warren DeBoer del Queens College della City University of New York, che è un'autorità in merito, per i Conibo ambiziosi era importante avere molte mogli che aiutavano a preparare la festa. Sia le mogli tradizionali che quelle rapite coltivavano la manioca e la facevano fermentare per produrre la birra, che era l'elemento centrale delle feste. Più erano le mogli (e le incursioni nei villaggi più a monte sul fiume erano una fonte sicura di donne), più era la birra che un uomo poteva produrre. Più birra poteva offrire, più grande era la festa e più elevato il suo rango sociale. Sembra che questa dinamica avesse radici profonde: la scoperta di recipienti per la fermentazione, la conservazione e il consumo della birra risalenti al primo millennio suggeriscono che le feste concorrenziali, e probabilmente la presenza di donne prigioniere per prepararle, fossero comuni tra gli antenati dei Conibo e in molte altre società antiche.

I prigionieri non producevano solo ricchezza, letteralmente la incarnavano. Praticamente tutte le piccole società tribali che ho studiato vendevano, commerciavano o regalavano le persone che avevano rapito. Come nel sistema schiavista nel sud degli Stati Uniti, i prigionieri avevano uno status basso ma erano beni di prestigio, e spesso erano la merce di maggior valore in possesso degli uomini delle piccole società tribali. Nel nord-est dell'America settentrionale, tra il XVII e il XVIII secolo, le tribù indigene usavano i prigionieri come doni per creare alleanze o risolvere dispute. Sulla costa del Pacifico settentrionale gli schiavi venivano scambiati o venduti tra i vari gruppi e si spostavano così lungo rotte commerciali consolidate. Nella Valle di Cauca, in Colombia, i resoconti più antichi dei primi esploratori, che risalgono alla metà del Cinquecento, parlano di mercati degli schiavi, un'istituzione che assai probabilmente precede il primo contatto con gli europei. In alcune parti del mondo gli schiavi funzionavano persino come valuta; per esempio, nell'Irlanda del primo Medioevo una schiava era l'unità di valore più elevata, usata come metodo di pagamento.

I prigionieri potrebbero aver avuto un ruolo importante nella transizione dalle tribù alle più complesse società statali

Dalla tribù allo Stato

Considerato l'impatto dei prigionieri sulla cultura dei gruppi in cui entravano, ipotizzo che abbiano avuto un ruolo importante in una delle transizioni sociali fondamentali nella storia umana: la formazione delle società statali più complesse. L'archeologo Norman Yoffee, dell'Università del Michigan, ha sostenuto che le società statali non emersero finché le posizioni socioeconomiche e governative non smisero di essere legate alla parentela. Inoltre la maggior parte degli archeologi e degli esperti di scienze sociali concorda nel ritenere che le società statali siano state almeno in parte il risultato del fatto che poche persone creavano e controllavano i beni in eccesso.

La cattura di prigionieri aiutò le società umane primordiali a raggiungere entrambe queste condizioni per l'evoluzione dello Stato. Naturalmente i prigionieri non erano l'unico fattore alla base della formazione degli Stati, infatti sono esistiti in molte piccole società tribali in tutto il mondo senza influenzare questo importante cambiamento sociale. Ma venivano catturati (e lo sono tuttora) per aumentare lo status sociale di uomini ambiziosi e, secondo me, diedero ad alcuni di questi uomini la possibilità di accumulare la ricchezza e il potere che furono alla base dei primi Stati.

Se la cattura di prigionieri contribuì alla formazione delle prime società statali, dovremmo aspettarci di trovare tracce della presenza di prigionieri tra i resti dei primi Stati, e infatti prove di questo tipo provengono da uno dei siti in cui ho lavorato nel sud-est degli Stati Uniti d'America, quello di Chaco Canyon, nel New Mexico.

Lo Stato di Chaco esistette dall'800 al 1250 d.C. circa, ed è stato descritto come l'unica società statale nel sud-est degli Stati Uniti. Gli studi dei resti umani hanno rivelato che nella zona circostante c'erano molte più donne nel periodo in cui Chaco era potente rispetto al periodo in cui non lo era; le sepolture all'interno del Chaco Canyon contengono molte donne tra i 15 e i 25 anni, che sono il sesso e l'età più comuni tra i prigionieri, e la forma dei teschi rinvenuti a Pueblo Bonito, il centro più grande di Chaco, suggerisce che molte delle donne lì sepolte fossero straniere. Inoltre, uno studio dei resti umani provenienti da una grande struttura in stile Chaco nei dintorni del Chaco Canyon ha trovato crani di donne con tracce di ferite rimarginate alla testa e altri traumi spesso associati alla condizione di prigionieri e di altre persone marginalizzate e abusate. Parlano della presenza di prigionieri a Chaco anche altre prove di violenze avvenute nella regione e i racconti orali tradizionali narrati tra gli attuali discendenti di quella popolazione.

Chaco non è l'unico esempio. L'archeologo Peter Robertshaw, della California State University a San Bernardino, ha studiato lo sviluppo degli Stati Bunyoro e Buganda dopo la metà del XV secolo in quello che oggi è l'Uganda occidentale, in Africa orientale, e ha scoperto che molte delle donne che lavoravano i campi di banane o di miglio erano prigioniere e trattate come merci. Robertshaw ipotizza che la domanda di queste donne per il lavoro agricolo sia stata il motore dell'evoluzione sociopolitica di quelle società.

L'idea che i prigionieri abbiano alimentato il cambiamento sociopolitico che avrebbe dato origine al mondo moderno non giustifica in alcun modo i vergognosi maltrattamenti di cui sono stati oggetto in epoca antica, storica o moderna. Tre anni dopo il saccheggio della loro patria da parte delle forze dell'ISIS, alcune delle donne e dei bambini yazidi che erano stati catturati sono tornati a casa, ma altri, a migliaia, rimangono ancora prigionieri. Spero ardentemente che altri yazidi possano tornare alle loro famiglie. Nel corso dei millenni, in situazioni del genere le donne non hanno quasi mai potuto nutrire una speranza simile; gli archeologi possono almeno riconoscere e onorare in parte le loro sofferenze raccontando le loro storie. ■

PER APPROFONDIRE

The Creation of Inequality: How Our Prehistoric Ancestors Set the Stage for Monarchy, Slavery, and Empire. Flannery K. e Marcus J., Harvard University Press, 2012.

Captives. How Stolen People Changed the World. Cameron C.M., University of Nebraska Press, 2016.

La schiavitù del XXI secolo. Bales K., in «Le Scienze» n. 405, maggio 2002.

PSICOLOGIA

Le due facce dell'empatia

Nuove teorie sui fondamenti dell'empatia potrebbero aiutarci a sfruttare questa emozione quando ne abbiamo più bisogno

di Lydia Denworth

L'anno scorso girava su Internet un video impressionante: alcuni tifosi di sesso maschile si sedevano, a turno, davanti a una cronista sportiva che era stata oggetto di tweet offensivi e misogini; gli uomini dovevano leggere ad alta voce i messaggi alla donna che li aveva ricevuti, e uno dei pochi esempi non censurabili era «spero che il tuo uomo ti riempia di botte». Il progetto, creato dal sito web *Just not Sports*, intendeva costringere gli uomini a toccare con mano «lo sconvolgente mobbing on line cui sono soggette ogni giorno le donne in ambito sportivo». Eliminando l'anonimato protettivo dei social media, questo esercizio trasmetteva il messaggio che, se qualcosa è troppo offensivo per dirlo in faccia, è anche troppo offensivo per digitarlo.

Maria Corte

Mentre leggevano, gli uomini erano visibilmente a disagio, e si agitavano sulla sedia: uno aveva l'aria di chi avesse appena ricevuto un pugno nello stomaco. Ognuno degli uomini coinvolti si è alzato dalla sedia avendo un'idea migliore di quanto orribile fosse stare dalla parte di chi riceveva tale malvagità.

In ultima analisi, l'esercizio illustrava come si manifesta l'empatia: la capacità di condividere ciò che sta provando un'altra persona – una paura da brividi mentre guardate un funambolo che attraversa le cascate del Niagara, o le farfalle nello stomaco perché vostro figlio, nervoso, sta per iniziare la recita. Nel XVIII secolo, l'economista Adam Smith fu tra i primi a dare un nome a questa emozione. La chiamò «reciproca simpatia», cioè la sensazione che qualcosa che vediamo accadere a un altro accada anche a noi. In lingua tedesca è detta *Einfühlung* (letteralmente «sentire dentro»). Eppure, l'empatia non è solo condivisione di sentimenti.

Quindici anni di studi di neuroscienze hanno indotto buona parte degli scienziati a considerare l'empatia un termine inclusivo, che comprende tre componenti principali. L'empatia emozionale – condividere i sentimenti di un altro e sintonizzarsi con gli stati comportamentali di quella persona (provare paura, per esempio, quando qualcun altro è su una fune) – è una risposta biologica che si riscontra in molte specie differenti, evolutasi nel contesto della cura parentale e della vita di gruppo; l'empatia cognitiva, detta anche assunzione di prospettiva o teoria della mente, è la capacità di riflettere sui sentimenti dell'altro e di capirli; e la preoccupazione empatica, o compassione, aggiunge la motivazione a fare qualcosa per la sofferenza dell'altro. Nel loro insieme, queste componenti sono elementi fondamentali della nostra vita sociale.

«Le persone provano empatia perché è fondamentale per formare relazioni strette, o proprio per relazionarsi con le persone», spiega Jamil Zaki, psicologo alla Stanford University.

Districare questi elementi – persino decidere se dovremmo districarli – è stata un'impresa complicata. In un articolo del 2008 un pioniere del campo, il primatologo Frans de Waal, ha descritto l'empatia come «una matrioska», con «meccanismi semplici al suo interno e meccanismi più complessi e capacità di assunzione di prospettiva negli strati esterni». Altri studiosi assumono una prospettiva differente, concentrandosi sulle differenze e optando per interpretazioni più ristrette. Queste diverse interpretazioni sono al centro di recenti dibattiti pubblici, stimolati in parte dal libro *Against Empathy*, dello psicologo Paul Bloom, della Yale University. Bloom ha dedicato il primo capitolo a specificare quale empatia non gli piace. L'empatia cognitiva gli va bene, ma considera l'empatia emozionale un fondamento debole per il comportamento morale, e sostiene che «è meglio senza». Non possiamo sbarazzarci dell'empatia emozionale, ma Bloom non ha tutti i torti: l'empatia non è sempre positiva. Anche de Waal ha ammesso in un suo libro del 2009 che non esistono «collegamenti necessari tra empatia e bontà». In alcune situazioni, l'empatia causa stress emotivo ed è sbilanciata naturalmente a favore delle persone a noi più care, a sfavore delle altre.

Lydia Denworth è saggista scientifica e autrice di *I Can Hear Your Whisper: An Intimate Journey Through the Science of Sound and Language* (Dutton, 2014). Sta lavorando a un libro sulla scienza del comportamento sociale.

Come società, in genere non la interpretiamo in quel modo. Nel 2006 Barack Obama non si riferiva al lato negativo dell'empatia quando lamentò il «deficit di empatia» della società; e i datori di lavoro che si rivolgono all'«allenamento all'empatia», particolarmente in voga in scuole, ospedali, aziende e dipartimenti di polizia, stanno cercando di risolvere problemi, non di crearli. Tuttavia lo sbilanciamento di fondo dell'empatia è al centro delle aspre divisioni nella società americana dopo l'elezione di Donald Trump. «È veramente difficile, doloroso e scomodo provare ad assumere la prospettiva, a capire realmente l'esperienza di qualcuno cui hai fatto del male o la cui opinione ti disgusta», commenta Zaki.

Maturando la ricerca sull'empatia, emerge anche una concezione più articolata di un'emozione complessa e ricca di sfumature, che spesso dipende dal particolare contesto in cui si manifesta. Psicologi e neuroscienziati vogliono capire meglio come funziona: quando funziona a nostro favore e quando a nostro sfavore.

La buona notizia è che l'empatia, intesa nel senso più ampio, non è un artefatto della psicologia pop. Può essere imparata come mezzo per risolvere dispute, ma il suo insegnamento va fatto con cautela. Il neuroscienziato cognitivo Emile Bruneau, direttore del Peace and Conflict Neuroscience Lab dell'Università della Pennsylvania, studia il ruolo dell'empatia nella risoluzione di conflitti, ma avverte: «Dobbiamo conoscerne le insidie, e accertarci che non abbiano un effetto paradossale. A quel punto possiamo usare quella informazione per effettuare interventi più efficaci».

Quindici anni di studi di neuroscienze hanno portato a stabilire che l'empatia ha tre componenti principali

Un fenomeno a più strati

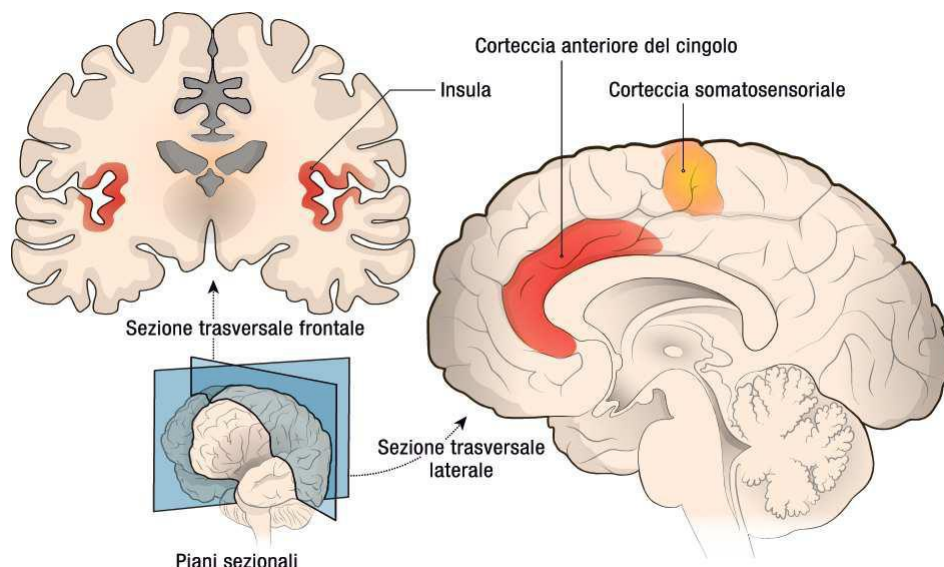
Gli psicologi si interessano all'empatia da decenni, ma l'approccio che introduce la neuroscienza nello studio dell'emozione è soltanto agli inizi. Il primo decennio di lavoro, anno più anno meno, è stato focalizzato a determinare le reti neurali indipendenti, ma interagenti, alla base dell'empatia emozionale e cognitiva. Nel 2004 la neuroscienziata Tania Singer, oggi al Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften di Lipsia, ha pubblicato

IN BREVE

Provare paura guardando un acrobata che cammina sul filo trasmette l'essenza dell'empatia emozionale e ci permette di condividere, talvolta in modo fisico, l'esperienza di un'altra persona. È una reazione essenziale nelle cure parentali e nella vita di gruppo.

Altri tipi di empatia ci aiutano ad adattarci alle richieste sociali. L'empatia cognitiva – assunzione di prospettiva – ci permette di considerare i sentimenti di un'altra persona. La preoccupazione emotiva, o compassione, offre la motivazione per contribuire ad alleviare la sofferenza di un altro.

Gli aspetti negativi dell'empatia derivano dalla consapevolezza che questi sentimenti e pensieri si sono evoluti per cementare relazioni all'interno delle famiglie e di gruppi coesi e non per aiutare ad affrontare minacce percepite e rivalità di lungo corso con persone estranee.

Collegarsi al dolore degli altri

Il mistero della rappresentazione dell'empatia nel cervello umano ha cominciato a svelarsi. Studi basati sulle neuroimmagini mostrano che alcune regioni cerebrali – l'insula e la corteccia anteriore del cingolo (*in rosso*) – si attivano, oltre che quando proviamo dolore fisico, anche quando siamo empaticamente testimoni di un'altra persona vittima di questa sensazione. Viceversa, la corteccia somatosensoriale (*in arancione*) si attiva solamente quando una persona prova il dolore fisico direttamente.

Fonte: *Empathy for Pain Involves the Affective but not Sensory Components of Pain*, di Tania Singer e altri, in «Science», Vol. 303, 20 febbraio 2004

su «Science» un articolo pionieristico con i suoi colleghi. I ricercatori hanno confrontato l'attività cerebrale in una persona che provava dolore con l'attività cerebrale di quella stessa persona mentre osservava soffrire una persona cara. Sedici donne sono state sottoposte a imaging cerebrale con la risonanza magnetica funzionale mentre il loro compagno sedeva accanto; vari livelli di stimolazione dolorosa venivano somministrati con un elettrodo all'uno o all'altro partner, e un segnale avvertiva le donne quando il partner provava dolore. Alcune aree del cervello delle donne si attivavano solo quando ricevevano a loro volta il dolore, ma altre parti – in particolare l'insula anteriore e la corteccia anteriore del cingolo – si accendevano a prescindere da chi stava soffrendo. L'empatia attivava le parti affettive, o emozionali, della rete del dolore, ma non la sensazione fisica di dolore. Quello studio, e molti altri successivi basati sulle neuroimmagini, indicano che il fulcro della nostra capacità di provare empatia inizia dal modo in cui il cervello rappresenta i nostri stati interni e si evolve fino a includere la nostra percezione di ciò che gli altri stanno provando.

L'empatia cognitiva, invece, rappresenta lo sforzo più oneroso di comprendere e ragionare sullo stato di un altro individuo, una capacità detta anche mentalizzazione, o teoria della mente. Essa compare nei bambini prima del primo anno di vita e continua a svilupparsi fino all'età adulta. È stato ripetutamente dimostrato che la rete mentalizzante del cervello include il solco temporale superiore, i poli temporali e la giunzione temporoparietale; un'altra area è la corteccia prefrontale mediale, posta dietro la fronte, che è associata alla riflessione su se stessi. La preoccupazione empatica attiva un'altra rete cerebrale ancora.

Il ruolo di ciascun aspetto dell'empatia è più che mai evidente quando uno di essi scompare. Una persona con disturbo dello spettro autistico ha scarse capacità di assumere la prospettiva dell'altro. Dal canto loro, le persone psicopatiche capiscono ciò che provano gli altri, ma hanno una mancanza profonda di preoccupazione empatica. «Distinguono ciò che è giusto da ciò che è sbagliato, ma la cosa non li tocca», hanno scritto in uno studio del 2016 il neuroscienziato Jean Decety, della Università di Chicago, e il collega Keith J. Yoder. Vari studi condotti da Decety avevano riscontrato che persone con livelli elevati di psicopatia hanno connessioni tra i neuroni anormali e un'attività anormale in aree del cervello associate all'empatia.

Nel loro studio del 2016, Decety e Joder hanno valutato 256 persone su scale di preoccupazione empatica, psicopatia e sensibilità morale a questioni legate a un senso di giustizia. I partecipanti hanno considerato otto scenari, ed è stato chiesto loro fino a che punto sarebbe ammissibile comportarsi in un certo modo. Per esempio, quando corriamo dietro a un autobus che passa di rado, sarebbe ammissibile non fermarsi ad aiutare una donna con un bimbo piccolo che ha rovesciato il contenuto della sua borsetta? Si è riscontrato che l'empatia cognitiva, ma non l'empatia emozionale, predice un senso di giustizia verso gli altri. Chi ha una «freddezza emotiva» elevata – una misura della psicopatia – era meno motivato da un senso di giustizia, ossia la percezione di ingiustizia o l'intensità di risposta che un individuo ha verso l'ingiustizia percepita. I ricercatori hanno concluso che «per indurre la preoccupazione verso gli altri potrebbe essere più efficace incoraggiare l'assunzione di prospettiva e il ragionamento (empatia cognitiva) anziché porre l'accento sulla condivisione emozionale della sventura altrui».

Uno studio pubblicato l'anno scorso su «Science» ha ipotizzato per la prima volta non solo dove potrebbe funzionare l'elaborazione dell'empatia, ma anche come. James Burkett, neuroscienziato della Emory University, ha scoperto un comportamento consolatorio nelle arvicole della prateria, una specie nota per la sua spiccata natura sociale. Coppie di animali maschi e femmine sono state messe insieme in una gabbia per alcune settimane, dopo di che la femmina è stata rimossa per breve tempo: veniva solamente tenuta separata per alcuni minuti, oppure riceveva un lieve scossa alla zampa, una forma di condizionamento alla paura che genera stress. Quando gli animali sono stati riuniti nella gabbia, il gruppo di Burkett ha osservato le loro interazio-

ni sociali. Se la femmina non era stata sottoposta a stress, nessuno dei due animali sembrava particolarmente ansioso. Quando però la femmina aveva subìto lo shock, il maschio si prodigava a curarle intensamente il pelo. Questo comportamento è interpretato come consolatorio, perché la coppia non l'aveva praticato in altre occasioni e perché aveva un effetto calmante sull'animale che aveva subito lo shock.

L'animale rimasto nella gabbia mostrava una risposta fisiologica che imitava quella dell'animale portato fuori. Inoltre, l'intensità della risposta consolatoria variava da animale ad animale. Quando è andato a osservare il livello di ossitocina – una sostanza che favorisce il legame sociale – nel cervello delle arvicole, Burkett ha scoperto una cosa interessante: la variazione di comportamento si poteva prevedere dalla densità dei siti di legame, o recettori, dell'ossitocina nella stessa parte del cervello – la corteccia anteriore del cingolo – identificata da Singer negli esseri umani che provavano empatia per il dolore altrui. Se aumentava la densità dei recettori, diminuiva la quantità di tempo dedicata da un animale all'attività consolatoria. Burkett ipotizza che i segnali con l'ossitocina in quell'area del cervello codifichino la sofferenza personale come risposta alla sofferenza degli altri. «Un certo livello di preoccupazione per la sofferenza altrui è necessario per motivare la consolazione. Troppa sofferenza personale induce però gli individui a sottrarsi, invece che a essere coinvolti», spiega.

Lo svantaggio dell'empatia

Lo studio di Burkett offre una possibile spiegazione di uno degli aspetti negativi dell'empatia. Quando le emozioni provate sono stressanti o dolorose, l'empatia è dolorosa, e ciò spiega perché talvolta evitiamo questi sentimenti. «Se empatizzo con ogni persona che versa in uno stato peggiore del mio, potrei essere motivato a donare il 95 per cento del mio reddito a organizzazioni benefiche», spiega Zaki. «Invece di ritrovarmi nel doppio vincolo morale tra senso di colpa e povertà, potrei semplicemente scegliere di non pensare alle persone meno fortunate di me». In alcune professioni, come quella medica o delle forze dell'ordine, dove l'esposizione alla sofferenza umana è quasi costante, uno stress personale troppo elevato interferisce con l'esercizio della professione. I medici, per esempio, soffrono di *burnout* eccessivo e corrono un rischio maggiore di altri di morte per suicidio.

Un problema più universale è che l'empatia è discriminante. «Si è evoluta affinché provassimo una maggiore empatia verso i familiari e gli amici che verso chiunque altro», spiega de Waal, che ha studiato a fondo l'evoluzione di questo sentimento. La qual cosa è ragionevole: la vita di gruppo è concepita per proteggersi dai predatori, e gli individui che hanno legami sociali forti vivono più a lungo e hanno più successo riproduttivo di altri. Ecco perché siamo spinti verso amici e parenti ed evitiamo naturalmente gli estranei. Mina Cikara, direttrice dell'Intergroup Neuroscience Lab, alla Harvard University, sostiene che «una componente fondamentale della natura umana è la tendenza a tracciare confini netti tra "noi" e "loro"».

Diversi studi svolti nell'ultimo decennio hanno esplorato questo problema e dimostrato che la questione degli *in-group* (i gruppi dei noi) e degli *out-group* (i gruppi dei loro) vale, oltre che per le differenze di razza e di gruppo etnico, anche per sport e rivalità consolidate tra college. Cikara e colleghi hanno riscontrato che i tifosi sfegatati dei Boston Red Sox (suo marito è uno di questi) provano più facilmente piacere, oltre che quando la loro squadra gioca bene, anche quando gli acerrimi rivali, i New York Yankees, giocano male. E chi prova più intensamente questa *Schadenfreude* (la gioia per le disgrazie altrui) ha più probabilità di venire alle mani con un tifoso degli Yankees e di fargli del male. Il discorso vale persino quando i gruppi in competizione sono di fantasia. In diversi studi, Cikara e i colleghi hanno assegnato in modo casuale i partecipanti a due squadre, che avevano chiamato Rattlers e Eagles, e avevano poi misurato le risposte a incidenti positivi o negativi che capitavano a membri di ciascuna squadra. Oltre a smorzare l'empatia per gli Eagles, identificarsi con i Rattlers aveva aumentato la «risposta contro-empatica», conosciuta anche come «non essere molto gentili».

In uno studio recente, Bruneau, Cikara e Rebecca Saxe, del Massachusetts Institute of Technology, hanno provato a determinare quale aspetto dell'empatia fosse il miglior indicatore di un comportamento altruistico attraverso i confini tra gruppi. Hanno reclutato tre gruppi di soggetti: agli statunitensi è stato chiesto di pensare agli arabi; agli ungheresi di pensare ai musulmani rifugiati; e ai greci di pensare ai tedeschi all'indomani della grande crisi del debito della Grecia. I partecipanti sono stati valutati per la preoccupazione empatica generale e per l'«empatia campanilista», il grado in cui le persone provano empatia verso il proprio gruppo rispetto a un altro. Ciascuno studio variava leggermente, ma in quello statunitensi-arabi i partecipanti leggevano eventi positivi e negativi che capitavano a personaggi come «Beth» del Nord Dakota o «Salma» egiziana. Venivano poi rivolte loro domande come: avrebbero rilasciato i visti degli Stati Uniti a persone arabe, e avrebbero fatto una donazione a un ente benefico arabo? L'empatia campanilista era immancabilmente l'indicatore più significativo dell'esito: più era elevata, minore era l'altruismo manifestato. La preoccupazione empatica generale non prevedeva nulla.

L'empatia si è evoluta per facilitare i rapporti con i familiari e gli amici, non per migliorare quelli con gli estranei

Questa ricerca mette in luce quanto sia complesso usare l'empatia per migliorare le relazioni tra gruppi che diffidano gli uni degli altri. «Se unite dei bambini appartenenti a una tra due fazioni in conflitto e provate a migliorare la loro empatia globale, questo non avrà alcun effetto su come tratteranno il gruppo dei loro», afferma Bruneau. «E se formano legami stretti con membri del proprio gruppo, in realtà potreste avere aumentato l'empatia verso il gruppo dei "noi" più che verso il gruppo dei "loro"». Migliorare davvero una situazione del genere – aggiunge Bruneau – richiede precisione: quando viene proposto un simile metodo, per esempio un campeggio che riunisce bambini cattolici e protestanti dell'Irlanda del Nord, «ciò che intendi davvero è che vuoi diminuire il gap empatico tra il nostro gruppo e il loro».

Una forza per il bene?

Naturalmente, migliorare una situazione è lo scopo degli interventi sull'empatia. Ma i tifosi a cui viene fatto provare il dolore dei tweet misogini cambieranno il proprio comportamento futuro? Non è detto. In uno dei primissimi e più conosciuti

esperimenti di psicologia sociale, Daniel Batson e John Darley, all'epoca entrambi alla Princeton University, lo dimostrarono in modo incredibilmente paradossale. Nel 1973 assegnarono ad alcuni seminaristi il compito di tenere un discorso sulla parabola del Buon Samaritano e ad altri di tenerne uno su un argomento non correlato all'altruismo; poi predisposero le cose in modo che i seminaristi si spostassero da un edificio all'altro per tenere il discorso, e che lungo il tragitto passassero davanti a una persona triste che si lamentava sul marciapiede. Lo studio contava quali seminaristi si fermavano ad aiutare: essere molto ferrati sul racconto del Buon Samaritano non faceva differenza nella probabilità di offrire aiuto, ma essere di fretta riduceva marcatamente la propensione a farlo. Tuttavia qualche decennio dopo Batson, oggi professore emerito all'Università del Kansas, stabilì che le persone che provano compassione prestano aiuto più spesso di quelle turbate dal dolore altrui.

Dai tempi del suo lavoro del 2004, Tania Singer ha mutato i suoi interessi e si è concentrata interamente sulla compassione. In vari studi pubblicati nel 2012 e nel 2013, nel suo laboratorio ha esaminato gli effetti neurali dell'allenamento alla compassione, definito come un sentimento di preoccupazione che include la motivazione a essere altruisti. L'addestramento consisteva di una tecnica contemplativa che estende ad altri esseri umani i sentimenti amorevoli che proviamo solitamente per le persone care. I ricercatori hanno scoperto che l'allenamento contemplativo aumenta le esperienze emotive positive, persino quando si è testimoni di altre persone in difficoltà; aumentava, inoltre, l'attività in parti del cervello associate con l'assunzione di prospettiva. In uno studio condotto nel 2014, Singer e colleghi hanno concluso che questa forma di allenamento alla compassione potrebbe essere «una nuova strategia per superare lo stress empatico e per rafforzare la resilienza».

Un certo livello di empatia stimola a consolare ma troppa sofferenza altrui induce a sottrarsi, anziché essere coinvolti

Zaki parla di empatia motivazionale, più che di compassione, benché siano essenzialmente la stessa cosa. Ha indagato in quale misura l'intervento «può influenzare il desiderio di empatia». A Stanford, ha unito le forze con la psicologa Carol Dweck, conosciuta per gli studi sugli influssi dell'atteggiamento mentale di una persona sull'esito della prestazione. Dweck ha scoperto che le persone con un atteggiamento mentale rigido, per esempio sull'intelligenza, credono di essere impotenti nel cambiare la qualità della prestazione; chi invece ha atteggiamenti mentali di crescita – per esempio un atteggiamento «positivo» – crede che, con un certo sforzo, la prestazione si possa migliorare.

In una serie di studi del 2014, Zaki, Dweck, e Karina Schumann, di Stanford, hanno scoperto che atteggiamenti simili esistono per l'empatia. I partecipanti convinti che lo sforzo potesse modificare il proprio livello di empatia erano più propensi a provare ad assumere la prospettiva di qualcuno di un out-group rispetto a chi considerava l'empatia un tratto stabile e non modificabile. Come hanno sostenuto i ricercatori, interventi futuri dovrebbero evidenziare la malleabilità dell'empatia.

In un'altra serie di studi, pubblicati nel 2016, Zaki ha dimostrato inoltre che le norme di gruppo possono stimolare le persone a essere più collaborative. Per esempio, in uno degli studi i partecipanti dovevano scegliere quanta parte di un dollaro donare a un ente benefico, prima di venire a sapere se altri erano stati generosi oppure spilorci. Inizialmente la donazione media era pari a nove centesimi, ma chi aveva poi osservato un comportamento generoso aveva aumentato significativamente la donazione, arrivando a dare quasi il doppio rispetto a chi aveva osservato un comportamento avaro.

Jason Okonofua, dell'Università della California a Berkeley, sta applicando questo tipo di risultati alle scuole. In uno studio del 2016 ha esaminato e cercato di cambiare l'atteggiamento mentale degli insegnanti verso la disciplina; insieme ai colleghi, ha incaricato, inizialmente in modo casuale, alcuni insegnanti di leggere uno di due brevi articoli: il primo ricordava l'importanza di una buona relazione insegnante-studente nell'aiutare gli studenti a imparare l'autocontrollo; il secondo asseriva che la punizione era cruciale affinché gli insegnanti avessero il controllo della classe.

Quando, successivamente, sono stati presentati agli insegnanti esempi di incidenti disciplinari ed è stato chiesto come avrebbero gestito la situazione, le risposte erano meno punitive se avevano letto l'articolo con l'impostazione mentale empatica. Un secondo esperimento ha chiesto a studenti di college di immaginare se stessi come studenti delle scuole medie in difficoltà con un insegnante per avere disturbato in classe andando di continuo dal banco al cestino della carta. Ai partecipanti è stato chiesto in che modo i livelli di rispetto verso l'insegnante erano influenzati dal fatto che intervenisse assegnando una punizione (punitivo) o ponendo, invece, delle domande e spostando il cestino più vicino al banco dello studente (empatico). Come previsto, gli studenti hanno riferito un maggiore rispetto verso gli insegnanti empatici.

Okonofua, infine, ha preparato un trial randomizzato per verificare se un breve modulo on line che incentivava la disciplina empatica avrebbe cambiato le cose nel corso di un anno accademico. Hanno partecipato insegnanti di matematica di cinque diverse scuole medie di tre diversi distretti della California. Alla fine è risultato che gli studenti i cui insegnanti avevano ricevuto l'intervento empatico invece di uno di controllo avevano metà delle probabilità di essere sospesi. Okonofua sta ora allargando lo studio a venti scuole.

È importante osservare che Okonofua stabilisce che cosa il suo intervento non fa: non chiede che gli insegnanti condividano la visione degli studenti della situazione; sottolinea, piuttosto, la comprensione e la valorizzazione della prospettiva degli studenti. Come si legge nell'articolo del 2016, l'obiettivo è la disciplina applicata «a un contesto di reciproca comprensione e fiducia».

Possiamo ancora definirla empatia? Okonofua pensa di sì. È empatia alla grande. E si sta rivelando di aiuto. ■

PER APPROFONDIRE

Empathy for Pain Involves the Affective but Not Sensory Components of Pain. Singer T. e altri, in «Science», Vol. 303, pp. 1157-1162, 20 febbraio 2004.

Against Empathy: The Case for Rational Compassion. Bloom P., Harper Collins, 2016.

Callous Traits in Children With and Without Conduct Problems Predict Reduced Connectivity When Viewing Harm to Others. Yoder K. J. e altri, in «Science Reports», Vol. 6, articolo n. 20216, 2 febbraio 2016.

Mari killer

Entro il 2100 potrebbe iniziare una nuova estinzione di massa

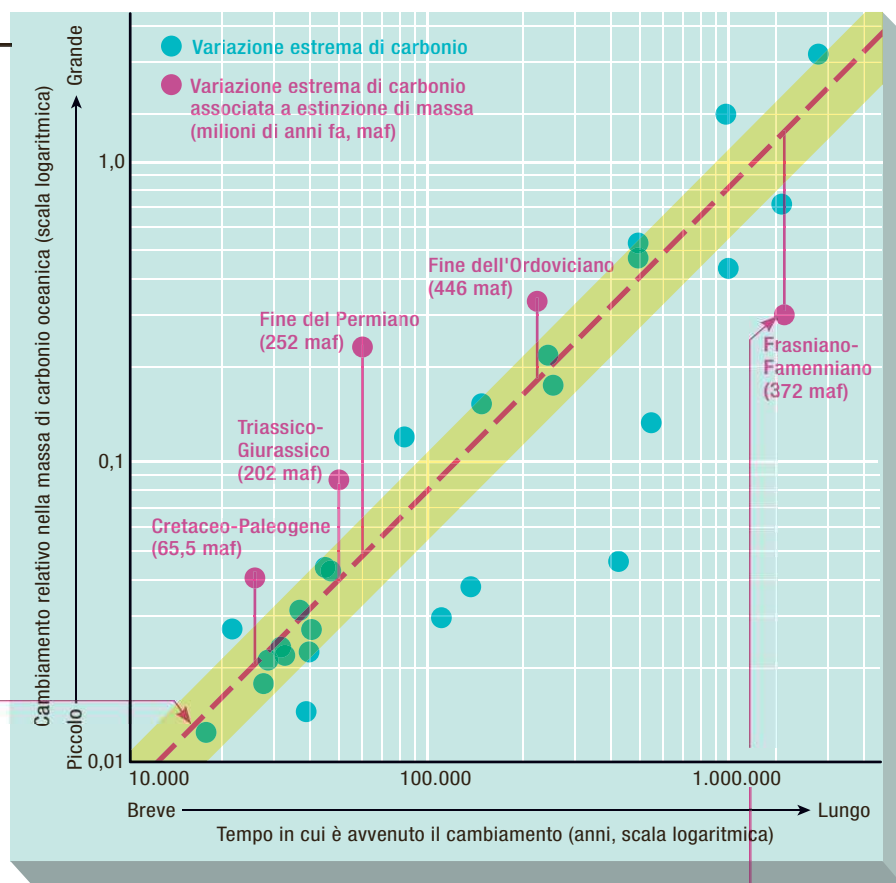
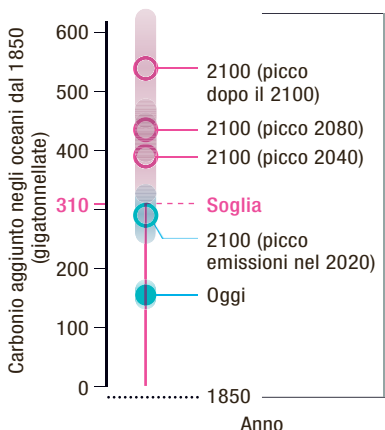
Nel corso delle ere geologiche la quantità di carbonio negli oceani è variata lentamente. Ma per 31 volte negli ultimi 542 milioni di anni, il livello del carbonio ha deviato molto dalla norma o è cambiato più velocemente del consueto (*punti nel grafico*). Ciascuna delle cinque estinzioni di massa che hanno caratterizzato la storia della vita sul nostro pianeta sono avvenute proprio in corrispondenza degli eventi più estremi del carbonio (*punti rosa*). In ognuna, è scomparso oltre il 75 per cento delle specie marine. Presto la Terra potrebbe entrare in una simile zona pericolosa.

Nel 1850, gli oceani contenevano circa 38.000 gigatonnellate di carbonio, ora uno studio di Daniel H. Rothman, geofisico al Massachusetts Institute of Technology, indica che aggiungendo altre 310 gigatonnellate o più, la deviazione diventerebbe acuta. Gli esseri umani hanno già contribuito con 155 gigatonnellate e il mondo è sulla traiettoria per raggiungere 400 gigatonnellate entro il 2100 (*grafico piccolo*). Secondo Rothman, tutto questo aumenta di parecchio la possibilità di un'estinzione di massa .

Mark Fischetti

Cinque estinzioni di massa

Gli oceani contengono 50 volte più carbonio rispetto all'atmosfera. La concentrazione è aumentata oppure diminuita in modo significativo 31 volte (*punti*) ma tipicamente mai più veloce di un tasso critico (*linea rosa; in giallo il margine di errore*). Quattro delle cinque estinzioni di massa nella storia della Terra sono avvenute quando la quantità di carbonio è cambiata molto più velocemente di questo tasso critico (*punti rosa sopra la linea*). La quinta c'è stata quando la variazione è avvenuta molto lentamente (*punto rosa sotto la linea*).

Soglia di instabilità
Gli eventi al di sotto della linea tratteggiata riflettono cambiamenti modesti nel ciclo globale del carbonio. Eventi al di sopra riflettono aggiunte insolite di carbonio e suggeriscono cambiamenti instabili e fuori controllo.

Sesta estinzione entro il 2100?

Dal 1850 a oggi il mondo ha aggiunto 155 gigatonnellate di carbonio negli oceani, così velocemente che il superamento di una massa critica potrebbe portare a un cambiamento catastrofico. Se l'aggiunta dovesse arrivare a 310 gigatonnellate, il pianeta andrebbe oltre quella soglia ed entrerebbe in una zona pericolosa per una sesta estinzione di massa. Altri scenari – toccare il picco di emissioni per poi ridurle iniziando nel 2040 o 2080 o dopo il 2100 – rendono sempre probabile il rischio di estinzione di massa.

Nuove specie mancanti
Questa grande e lenta aberrazione nel carbonio oceanico sembra accompagnata da un'anomalia strana: oltre un milione di anni in cui sono emerse poche nuove specie. In questo arco di tempo sono scomparse altre specie, diminuendo in modo significativo il loro numero totale.

Fonte: *Thresholds of catastrophe in the Earth system*, di Daniel H. Rothman, in «Science Advances», Vol. 3, n. 9, articolo n. e1700906, 20 settembre 2017.

di Paolo Attivissimo
Giornalista informatico e studioso della disinformazione nei media

Le utili collette per la scienza

Coinvolgere i cittadini nella ricerca è utile per abbattere muri di incomunicabilità

L'ipotesi scientifica di una megastruttura artificiale aliena per spiegare le variazioni di luminosità osservate nella stella KIC 8462852 (o stella di Tabby), situata a circa 1000 anni luce dalla Terra, ha avuto un notevole successo mediatico nei mesi scorsi: gli extraterrestri fanno sempre notizia. Ha avuto il merito di mostrare al grande pubblico che le persone di scienza discutono di vita aliena in tutta serietà, spiazzando chi ancora crede che ci sia un'ufologica congiura del silenzio o che si tratti di un argomento infantile, anche se le successive osservazioni astronomiche più estese e approfondite hanno chiarito che qualunque cosa stesse causando quelle variazioni anomale, irregolari e rapide non era una struttura solida e opaca, ma probabilmente polvere cometaria, smorzando drasticamente gli entusiasmi.

Tuttavia il clamore e il successivo disappunto hanno messo in secondo piano un aspetto fondamentale di questa vicenda, ossia il modo in cui sono state finanziate quelle osservazioni: oltre 1700 persone comuni hanno partecipato a una raccolta di fondi via Internet per acquistare tempo osservativo presso la rete mondiale di telescopi del Las Cumbres Observatory. Circa 100.000 dollari hanno permesso di completare un anno di monitoraggio della stella di Tabby (il nome deriva da Tabetha S. Boyajian, l'astronoma statunitense che per prima aveva rilevato le oscillazioni bizzarre nella luminosità di KIC 8462852) registrando un'enorme quantità di dati e documentando il fatto che le variazioni di luminosità non erano uniformi su tutte le frequenze e che quindi non erano prodotte dal transito di una serie di grandi oggetti solidi davanti alla stella. Per togliersi un dubbio scientifico intrigante, insomma, queste persone hanno deciso di mettere mano al portafogli invece di aspettare che qualche ente scientifico dipanasse lentamente le matasse della burocrazia per finanziare ed effettuare questa ricerca.

È un modo originale e concreto di coinvolgere l'opinione pubblica nella scienza e non è il solo caso del suo genere: per esempio, anche la scoperta stessa delle anomalie della stella di Tabby è avvenuta grazie alle ricerche effettuate da cittadini scienziati (*citizen scientists*), radunati nel gruppo on-line PlanetHunters.org, che nell'esaminare i dati raccolti dalla sonda Kepler della NASA alla ricerca di segni della presenza di pianeti extrasolari hanno notato le curve di luminosità insolite di questa stella.

In fisica, gli oltre 32.000 volontari non esperti del progetto di *citizen science* HiggsHunters.org hanno dimostrato di saper selezionare le collisioni di particelle generate dall'esperimento ATLAS dell'LHC del CERN di Ginevra con un'efficienza e un tasso di errore comparabili a quelli degli algoritmi usati dai ricercatori, sfruttando il talento umano innato nel classificare le immagini.

In matematica, il progetto GIMPS usa da anni i computer degli appassionati per cercare numeri primi di Mersenne sempre più grandi in cambio di fama, come è accaduto a fine anno a Jonathan Pace, che a dicembre 2017 ha scoperto il più grande numero primo conosciuto, con oltre 23 milioni di cifre, e in cambio di premi in denaro: ci sono 150.000 dollari in palio per chi troverà un numero primo con 100 milioni di cifre.

Il volontariato scientifico non può certo sostituire in blocco la ricerca scientifica istituzionale e inevitabilmente tende a incentivare i progetti più emotivamente appaganti a discapito di quelli tediosi, ma ha dimostrato di essere un valido complemento. Soprattutto ha un pregio che non si può quantificare ma è indubbiamente prezioso: abbattere la barriera psicologica che separa troppo spesso il cittadino comune dallo scienziato e facilita la costruzione di antagonismi inutili.

Niente ET. Illustrazione della stella di Tabby, con l'anello di polvere responsabile delle variazioni di luminosità che avevano fatto pensare anche a una civiltà aliena.

Cortesia NASA/JPL-Caltech

di Beatrice Mautino
Biotecnologa, giornalista e comunicatrice scientifica. Tra i suoi libri più recenti, l'e-book *Stamina. Una storia sbagliata* (2014) e *Contro natura*, con Dario Bressanini (Rizzoli, 2015)

Collagene a colazione? Sì, no, forse

Gli effetti antirughe della nutricosmetica non sono ancora del tutto convincenti

"Una ricerca indipendente ha mostrato significativi miglioramenti nella riduzione delle rughe in seguito all'integrazione regolare di collagene. Sia in farmacia che in erboristeria è possibile trovare gli integratori di collagene sotto forma di pastiglie.»

Messaggi simili sono diventati comuni nelle pubblicità. La chiamano nutricosmetica, va a braccetto con la nutraceutica ed è la nuova frontiera della cosmesi, il settore su cui si stanno gettando le aziende di prodotti per la cura del corpo e che, secondo le previsioni, entro i prossimi cinque anni raggiungerà un fatturato globale di 7,4 miliardi di dollari. Il ruolo di apripista è toccato proprio al collagene, la proteina responsabile del mantenimento dell'impalcatura della pelle, venduto in pastiglie, polvere o in forma liquida a prezzi esorbitanti: una media di 30 euro per 30 grammi di prodotto, 1000 euro al chilogrammo.

L'idea alla base di questi prodotti è affascinante: indurre i fibroblasti, le cellule produttrici di collagene, a produrne di più. Il collagene è formato da tre proteine che si attorcigliano l'una sull'altra a formare una struttura che somiglia a una corda. Queste strutture si dispongono perpendicolarmente alla profondità del derma e tengono la pelle ben ferma e tesa. Quando sorridiamo o aggrottiamo le sopracciglia sottoponiamo le fibre di collagene a uno stress che si manifesta con una piega «temporanea» della pelle. A un'altra proteina, chiamata col nome evocativo di «elastina», tocca il compito di riportare tutto alla normalità in tempi brevi. Man mano che passano gli anni, però, i fibroblasti, lavorano meno, producendo meno collagene ed elastina e rendendo la pelle meno tesa e meno elastica. Il risultato è che a forza di sorridere e di arrabbiarci, le pieghe diventano sempre meno temporanee e sempre più permanenti. Insomma, si trasformano in rughe.

Gli integratori dovrebbero invertire questo processo facendo credere ai fibroblasti di avere ancora a disposizione molti mattoni per costruire l'impalcatura di collagene. Il condizionale però è d'obbligo perché, per il momento, di dati scientifici solidi a supporto di queste affermazioni non ce ne sono.

Le aziende produttrici di integratori di collagene stanno investendo molto per riuscire a dimostrarne l'efficacia. Sono decine, ormai, gli studi in corso, alcuni anche costruiti bene dal punto di vista metodologico, del tutto paragonabili a veri e propri trial clinici, ma hanno due limiti principali.

Il primo è che nessuno di questi è davvero «indipendente», perché sono tutti effettuati o finanziati da aziende interessate a dimostrare che i loro prodotti funzionano. Questo non significa che i risultati non siano validi, ma ci obbliga a leggerli con maggiore cautela. Il secondo limite è il più importante e riguarda i risultati, che non sono mai davvero convincenti. In alcuni casi, l'effetto degli integratori si vede, ma solo in una percentuale molto ridotta dei soggetti. In altri casi, i ricercatori hanno scelto di somministrare integratori contenenti molte molecole diverse rendendo impossibile stabilire se il miglioramento misurato sia da attribuire al collagene, agli antiossidanti, ai minerali o a tutti quanti messi assieme.

Gli integratori di collagene promettono di stimolare i fibroblasti, le cellule che producono la proteina, ma non ci sono dati scientifici solidi a confermarlo.

ronstick/iStock

Al momento, quindi, sulla base dei dati a disposizione non si può affermare che il collagene assunto con la dieta abbia un effetto sulla riduzione delle rughe. Se però siete sperimentali come la sottoscritta e volete provarne comunque gli effetti senza aspettare i nuovi risultati degli studi in corso, mi permetto di consigliarvi un'opzione più economica degli integratori: i fogli di gelatina che sono comunemente chiamati «colla di pesce» e che si usano in pasticceria. Ve li portate a casa a un decimo del prezzo degli integratori e con quel che avanza ci potete anche fare la panna cotta.

di Dario Bressanini
chimico, divulgatore interessato all'esplorazione scientifica del cibo.
Autore di *Pane e Bugie*, *OGM tra leggende e realtà* e *Le bugie nel carrello*.

Aquafaba delle meraviglie

L'acqua di cottura dei legumi può essere usata per preparare meringhe

L'albume, grazie alle sue tante proprietà, è uno degli ingredienti più straordinari e versatili in cucina. Due in particolare sono molto sfruttate nelle ricette: la sua capacità, se montato, di intrappolare l'aria formando una schiuma e l'abilità di formare un gel se riscaldato in presenza di acqua. Queste due proprietà sono dovute alla particolare composizione dell'albume, costituito per il dieci per cento circa di proteine in acqua, e in particolare alla capacità di queste proteine di denaturarsi facilmente con il calore o inglobando aria con la battitura. Le bollicine d'aria della schiuma sono stabilizzate dagli amminoacidi delle proteine: quelli idrofobici si rivolgono verso le bolle d'aria mentre quelli che amano l'acqua si dispongo verso la fase liquida.

Le proteine dell'albume non sono certo le uniche ad avere queste proprietà: è possibile per esempio preparare meringhe usando la schiuma del latte, costituita da proteine con proprietà simili. Da vari anni l'industria alimentare usa proteine di origine vegetale, spesso estratte dai legumi, per sostituire l'albume in prodotti destinati a persone allergiche all'uovo o a persone che preferiscono non consumare prodotti animali, ma raramente questi ingredienti si sono fatti strada nelle preparazioni casalinghe. Di recente però un ingrediente curioso si è aggiunto nella dispensa di chi ama sperimentare in cucina: l'acqua di cottura dei legumi, in particolare quella dei ceci. Quel liquido denso e viscoso che generalmente gettiamo quando apriamo una lattina di ceci precotti ma che invece può essere usato per preparare, per esempio, meringhe senza uova.

Prendete una lattina di ceci, scuotetela bene, apritela e filtrate il liquido. Riponete i ceci per un'altra ricetta. Mettete il liquido in una bacinella e iniziate a montare con uno sbattitore. Un pizzico di cremor tartaro aiuterà a montare. Lentamente si formerà una schiuma: le bollicine d'aria rimangono intrappolate nella fase liquida. Aggiungete via via lo zucchero: 70 grammi ogni 100 grammi di liquido. In una decina di minuti dovreste ottenere una schiuma bianca densa, molto simile a quella dell'albume. Montatela fino a quando è bella soda, poi formate delle meringhe su una teglia, infornate e cuocete a 100 °C per due ore. Il leggero odore di ceci dovrebbe sparire in cottura.

Da quando l'acqua di cottura dei legumi è assurta a ruolo di ingrediente le è stata dato il nome di *aquafaba*, dal nome latino delle fave, un legume mangiato dai Romani. Il nome è stato coniato da Goose Wohlt, un ingegnere informatico che per primo nel 2015 ha raccontato sui *social network* i suoi esperimenti con l'acqua di cottura dei ceci.

Finora sono stati effettuati pochi studi sull'acqua di cottura dei legumi. Nel 2017 una ricerca della Lincoln University, in Nuova Zelanda, ha analizzato la composizione dell'acqua di cottura di vari legumi e studiato il loro uso nella produzione di meringhe: 100 grammi di acqua di cottura dei ceci contengono circa 1 grammo di proteine, 1,2 grammi di zuccheri e 2,4 grammi di fibre insolubili. Non c'è amido, ma è presente una grande quantità di saponine, ovvero sostanze chimiche che, come indica il nome, aiutano la produzione della schiuma. Probabilmente è la presenza contemporanea di tutte queste sostanze a donare all'acqua dei ceci proprietà simili a quelle dell'albume.

Quelle tradizionali. Le meringhe sono preparate con albume di uovo o anche con schiuma del latte, entrambi ricchi di proteine dalle proprietà simili tra loro.

I ricercatori hanno poi preparato delle meringhe. Quelle ottenute dall'acqua dei ceci, dalle lenticchie verdi e dai piselli gialli erano simili per forma e consistenza alle classiche meringhe d'albume. Il sapore di quelle di lenticchie tuttavia non è stato gradito dagli assaggiatori, che invece hanno trovato quelle di ceci e di piselli di gradimento solo di poco inferiore a quelle d'albume.

Se vi piace sperimentare in cucina provate a usare questo nuovo ingrediente per creare nuove ricette, dalla maionese senza uova a nuovi impasti per preparazioni dolci e salate.

di Rodolfo Clerico, Piero Fabbri e Francesca Ortenzio

Dress code black tie

"Ma dai, è umanamente possibile che io debba...».

«Taci e osservami! Il nodo del papillon non è mera questione tecnica, ma espressione di pura forma d'arte!»

Nel bel mezzo del soggiorno, dritti in piedi uno di fronte all'altro, Rudy e Piotr non riescono a sembrare l'uno l'immagine riflessa dell'altro solo per banali questioni di stazza; per tutto il resto, dall'abbigliamento ai gesti delle mani che armeggiano intorno ai rispettivi colli, sono invece perfettamente speculari e identici. Almeno nelle intenzioni...

«Humpf. Adesso ho un motivo in più per invidiare Treccia: lei non è costretta a subire queste torture con questi ammennicoli certamente partoriti da menti malate che...»

«Ti stai riferendo ai problemi che sono solito proporti, o al fatto che il *dress code* del ballo di stasera è informale?»

«Per una volta no, non sto parlando dei tuoi problemi. O meglio, visto che il problema sei comunque tu, sì! Sto parlando di un solo problema, quest'affare che devo attorcigliarmi addosso evitando nel contempo l'ebbrezza dell'autostrangolamento. Ma con che coraggio definisci "informale" questa pagliacciata?»

Con un ultimo gesto preciso e netto come quello delle *geishe* durante il rito del *cha no yu*, Rudy allinea perfettamente le due ali della sua cravatta con la linea immaginaria tesa dalle punte del colletto della sua bianchissima camicia.

«Le ricordo, Dottor Silverbrahms, che il *tuxedo* (così chiamato perché proposta come "giacca da fumo" tra i frequentatori del Tuxedo Park di New York e che noi, con un certo grado di provincialismo, chiamiamo banalmente *smoking*) è l'abito previsto dal *dress code black tie* (ossia farfallino nero), che è comunque quasi il massimo dell'informalità concessa ai ricevimenti di un certo livello. Avrei voluto vederti se fosse stato un *white tie*... anzi no, ormai quello viene richiesto quasi solo per la cerimonia del Nobel, e non riesco proprio a immaginarti in quell'occasione.»

La specularità è definitivamente spezzata; Rudy, dritto come un fuso, si dirige verso la teca delle pipe; Piotr, assai meno marzialmente, armeggia ancora la sottile e ondeggiante striscia di seta color nero.

«Come no, proprio una cosa veloce tra amici... L'inventore deve essere lo stesso della vergine di Norimberga: entrambi gli aggeggi portano allo stesso risultato per lo sfortunato contenuto. E poi, che idea, organizzare il ballo di fine anno accademico alla facoltà di matematica... superata in assurdità solo dall'idea di invitarci. E se conosco un po' i matematici, avranno interpretato le parole "dress code" come un'applicazione software destinata a moralizzare i siti porno. Arriveranno tutti in felpa e pantaloni sformati, con solo noi vestiti da pinguini.»

«Il ballo è un'attività matematica, Doc. Non dimenticarlo», dice il contenuto di un sorprendente abito blu, lungo, da sera, mentre si avvicina ticchettando su un paio di *decolleté* tacco 12 al collo di Piotr.

«Treccia, non mettertici anche tu! Altrimenti, potrei cominciare a lamentarmi dell'enorme fortuna che hai, nel poterti limitare a entrare dentro un liscio vestito leggero senza tanti nodi balordi che...»

Illustrazione di Stefano Fabbri

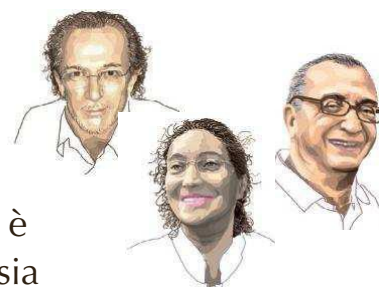
«"Balordo" è la parola giusta, quella sbagliata è "nodo". Per i matematici, questi non lo sono, avendo due estremità aperte. Comunque, direi che anche tu non ti sei accorto della grande fortuna che hai.»

«...e sarebbe? Due sedicenti amici che non fanno altro che prendermi in giro?»

«Mi riferisco al fatto che Rudy è mancino, e quindi fa un nodo specularmente opposto a quello tradizionale. Nel metterti davanti a lui ripetendo specularmente i suoi gesti, hai quantomeno ottenuto un nodo che, seppure non perfettamente assemblato, è quantomeno regolare, classico e...»

«...e molto convenzionale», sogghigna la voce baritonale dall'angolo opposto della stanza: «Il mio, con la sua aria "sinistra", getterà un moderato scompiglio tra i partecipanti.»

«Come no. Mi figuro tutti i convenuti meravigliati e basiti di fronte a cotanta audacia antisimmetrica. Datti pace, Capo, non se ne accorgerà nessuno... a parte forse i topologi, ma quelli saran-

La soluzione del problema esposto in queste pagine sarà pubblicata in forma breve sul numero di marzo e in forma estesa sul nostro sito: www.lescienze.it. Potete mandare le vostre risposte all'indirizzo e-mail: rudi@lescienze.it.

Il ballo di fine anno accademico alla facoltà di matematica è un'occasione che Rudy sfrutta per dare sfogo alla sua fantasia

IL PROBLEMA DI GENNAIO

Il mese scorso si parlava dell'anno scorso; o, per essere un po' meno criptici, del comparire del numero 2017 (e anche del numero 20.000) in una sequenza creata a partire da [1 1] e poi inserendo negli «spazi» tra i numeri presenti la somma dei numeri che delimitano lo spazio medesimo. In pratica, i primi passaggi saranno [1 1], [1 2 1], [1 3 2 3 1], [1 4 3 5 2 5 3 4 1], [1 5 4 7 3 8 5 7 2 7 5 8 3 7 4 5 1], ...

Notiamo che, detti a e b (con $b > a$) due numeri vicini al k–esimo passaggio, la coppia ordinata (a,b) può apparire soltanto una volta, perché il maggiore b ha come «generatori» i numeri a e $b-a$, che erano vicini al passaggio $k-1$. Per ricorrenza si verifica inoltre che, con l'ovvia eccezione degli estremi dell'intervallo che sono degli 1, le coppie (a,b) sono sempre formate da numeri primi tra loro. Ne consegue che ogni numero n apparirà tante volte quanti sono i modi di rappresentarlo sotto forma di somma di due numeri positivi primi tra loro o, il che è lo stesso, tanti quanti sono gli interi minori di n relativamente primi con esso: e questa altro non è se non la funzione di Eulero $\phi(n)$, o toziente.

Essendo 2017 primo, $\phi(2017) = 2016$, quindi il numero comparirà 2016 volte; la sua ultima comparsa sarà alla 2017_{esima} riga, come secondo membro. Per quanto riguarda 20.000, è compreso tra 17.711 e 28.657, rispettivamente ventunesimo e ventiduesimo termine della serie di Fibonacci (ridotta del primo termine), che è un'ottima estimatrice dei massimi del toziente. Al termine del k_{esimo} passaggio, avremo $2^k + 1$ termini sulla linea, e il termine massimo della linea è il $(k+1)_{esimo}$ termine della serie. 17.711 compare quindi per la prima volta durante il ventesimo passaggio, al termine del quale avremo scritto $2^{20} = 1.048.576$ termini; quindi, il numero 20000 non compare nel primo milione di termini.

no già occupati a trasformare le olive ripiene in bottiglie di Klein. Ergo, se io potessi ripescare dall'armadio la felpa dell'università e quei pantaloni che...»

«Non se ne parla neanche, violeresti anche il dress code non scritto degli accademici: solo coloro che sono universalmente riconosciuti come geni possono presentarsi vestiti da straccioni. Se volessimo adeguarci di conseguenza, dovresti presentarti ricoperto di fiocchi, lustrini e crinoline da far sembrare quella del Re Sole la *mise* di uno spazzacamino disoccupato e frettoloso. E poi non lamentarti: sappiamo tutti che balli come un'ameba zoppa, lascia che i presenti ti ridano dietro solo per questo, e non per come sei vestito.»

«Eviterò che ridano anche per il resto: col cavolo che mi metterò a ballare...»

Alice guarda in tralice Rudy, mentre toglie un immaginario granello di polvere dalla giacca di Piotr: «Come al solito non gli hai ancora detto niente, vero Capo?». Poi, senza aspettare la retorica risposta: «Temo che tu non possa cavartela così a buon mercato, Doc... almeno una danza temo che dovrai farla: quella per cui Rudy ha scritto la musica e definito i passi.»

«Alice, tu potrai imitare la regina del Paese delle Meraviglie e credere anche sette cose impossibili prima di colazione, ma io no. Rudy che scrive musica? Ma se non sa distinguere un bequadro da un Chi Quadro...»

«Molto spiritoso», risponde il chiamato in causa, «e hai quasi ragione: non ho scritto la musica, mi sono limitato a sceglierla. Ma ti assicuro che non è stato facile trovare un pezzo di esattamente 144 battute.»

«E la definizione dei passi e dei movimenti – insiste Piotr – ma davvero è roba tua? Ti prego, dimmi di no... altrimenti ci sono solo due possibilità: o hai creato un obbrobrio, o ti sei ispirato a qualche regola matematica, cosa che probabilmente ricondurrà il valore estetico del ballo sempre ai livelli dell'obbrobrio testé citato.»

«Anche stavolta hai quasi ragione, almeno per quanto riguarda l'ispirazione matematica. Sul valore estetico, mi consentirai di non raccogliere le insinuazioni di chi non sa neppure allacciarsi un papillon. E comunque sì, il tradizionale ballo di apertura sarà composto dai brillanti accademici matematici disposti in cerchio, e ciascuno di loro avrà il suo partner di danza nella posizione diametralmente opposta alla sua. A ogni battuta della musica, due e solo due matematici adiacenti batteranno gioiosamente le mani e si scambieranno di posto tra di loro. Alla fine dell'incantevole e tersicorea musica, ogni matematico danzatore dovrà trovarsi nella posizione che inizialmente occupava il suo partner. Non la trovi un'idea simbolica, rivoluzionaria, evocante il cambiamento d'anno accademico?»

«Oh, di aggettivi me ne vengono in mente una valanga, e "rivoluzionario" è probabilmente quello meno sanguinolento. Ma hai già preparato i poveri accademici all'idea? Hai fornito loro una sorta di manualetto per la coreografia, in modo che ognuno di loro, che tutti, insomma... a proposito, quanti sono, in tutto, quei poveri disgraziati?»

«Quanti sono? Hai il coraggio di chiedermi quanti sono? Oh, beh... stai pure tranquillo, Doc, non ti capiterà mai di sicuro l'invito a un ricevimento con *dress code white tie...* »

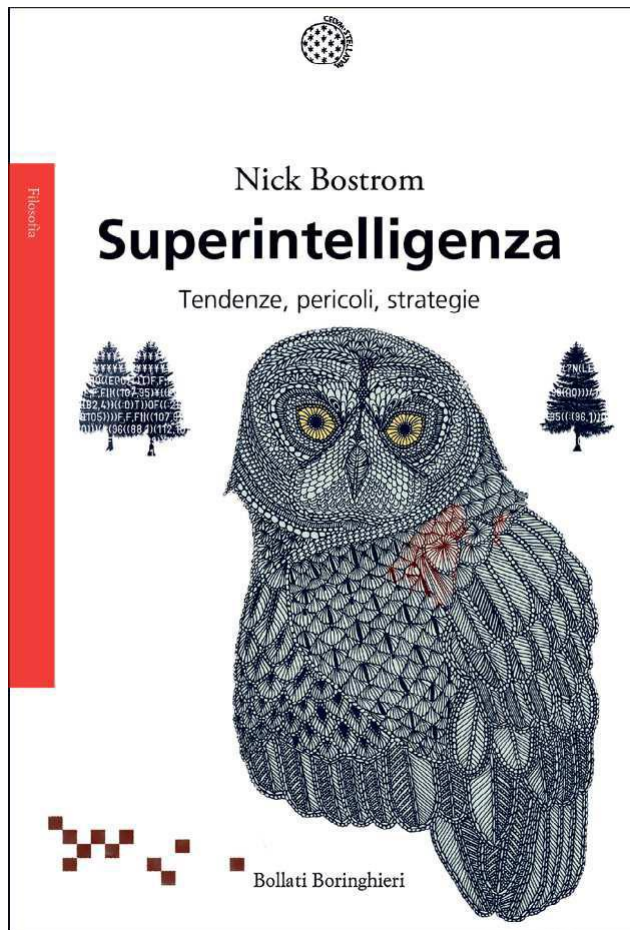
Il futuro dell'intelligenza artificiale

Superintelligenza
di Nick Bostrom
Bollati Boringhieri, Torino, 2018, pp. 522 (euro 28,00)

"Prima della prospettiva di un'esplosione di intelligenza, noi esseri umani siamo come bambini che giocano con una bomba, tale è il divario tra la potenza del nostro giocattolo e l'immaturità della nostra condotta.» La visione del futuro tratteggiata da questo libro ha le tinte fosche di una minaccia incombente, una sorta di ordigno «fine di mondo» aggiornato all'era digitale che potrebbe soggiogare la specie umana e prendere il sopravvento sul nostro pianeta. Non è un caso se il libro di Nick Bostrom, che finalmente vede la luce anche in traduzione italiana, sia diventato poco dopo la pubblicazione nel 2014 un *bestseller* del «New York Times», e assurto a testo di riferimento per quei rappresentanti dell'*élite* digitale, da Elon Musk a Bill Gates, che vanno predicando ormai da qualche tempo la necessità di adottare contromisure a uno sviluppo potenzialmente incontrollato dell'intelligenza artificiale (IA). Se però nel dibattito pubblico globale i timori più diffusi si concentrano sul rischio che sistemi di intelligenza artificiale stravolgano il mondo del lavoro, Bostrom invita ad allargare l'inquadratura fino a un campo lunghissimo, per intravedere un futuro in cui l'IA avrà non solo raggiunto ma superato le prestazioni del cervello umano, e dato vita a una superintelligenza.

In un futuristico scenario di presa del potere, la superintelligenza trova il modo di sintetizzare segmenti di DNA, sfruttando laboratori e corrompendo esseri umani connessi in rete, per produrre proteine e assemblare nanomacchine che saranno l'esercito con cui conquistare il pianeta e poi ancora costruire sonde di von Neumann (sonde spaziali in grado di autoreplicarsi) per colonizzare lo spazio extraterrestre. Se vi sembra solo un bizzarro esercizio di immaginario fantascientifico, sappiate che Bostrom ha costruito un sofisticato e assai denso saggio filosofico-scientifico per ragionare attorno a scenari come questo.

Bostrom è una figura singolare: filosofo britannico con radici svedesi, una formazione universitaria multidisciplinare anche in matematica, fisica e neuroscienze computazionali, esponente di spicco del movimento transumanista e teorico del potenziamento umano, oggi dirige un influente organismo accademico, il Future of Humanity Institute di Oxford che fornisce consulenze al World Economic Forum, all'Organizzazione mondiale della sanità e a governi.

Superintelligenza non può certo essere considerato un libro di divulgazione, perché è piuttosto un lungo ragionamento, caratterizzato però da un linguaggio a tratti arduo da seguire, per l'uso ostentato di alcuni neologismi filosofici come *singleton*, espressioni come «istanziazione malvagia» o frasi come «un risultato inizialmente multipolare potrebbe convergere in un singleton post-transizione» che appesantiscono la lettura (in coda al libro viene fornito per fortuna un «glossario parziale»). Spesso si ha l'impressione di trovarsi di fronte a ragionamenti puramente speculativi.

Eppure va riconosciuta a Bostrom un'indubbia capacità di articolare con grande ampiezza di prospettiva (e fervida capacità immaginifica) problemi e dilemmi che l'umanità si troverà a fronteggiare quando il tentativo di creare un'intelligenza artificiale che sia in grado di simulare le capacità di un'intelligenza generale umana (e non limitata al saperci sconfiggere a scacchi) sarà stato raggiunto. A quel punto per Bostrom potrebbe essere già troppo tardi per prevenire lo sviluppo di «un'esplosione di intelligenza», una forma di superintelligenza che surclassi le capacità cognitive umane.

Ci sono capitoli del libro, come quello dedicato al problema della scelta dei valori morali da instillare nell'IA, pieni di spunti di riflessione interessanti, altri come quelli iniziali – dedicati all'analisi del potenziamento umano per generare una superintelligenza biologica che fosse in grado di competere con una superintelligenza digitale – che suonano un po' semplicisti per il modo sbrigativo con cui Bostrom tratta temi complessi come la selezione genetica di embrioni umani. Un saggio col quale dovremo in ogni modo continuare a fare i conti negli anni a venire, che saranno segnati sempre più dalla convivenza tra intelligenze umane e artificiali.

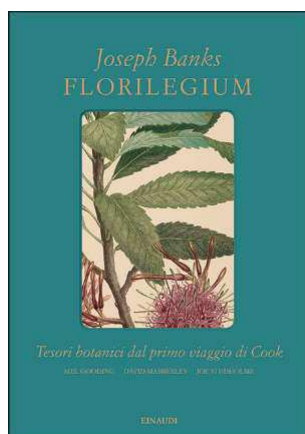
Marco Motta

Immagini e racconti per un atlante storico della vita

La storia della vita in 100 fossili
di Paul D. Taylor e Aaron o'Dea
Sironi Editore, Milano, 2017, pp. 232 (euro 24,90)

Solo una minuscola frazione delle creature vissute sulla Terra ha lasciato tracce fossili. Solo una piccola parte dei fossili è stata disseppellita e studiata. E solo 100 di questi fossili sono stati scelti da Paul D. Taylor, a lungo paleontologo al Natural History Museum di Londra, e Aaron O'Dea, dello Smithsonian Tropical Research Institute di Panama, per dare uno spaccato della storia della vita sulla Terra. Le 100 splendide foto, accompagnate da altrettanti racconti, divengono icone di altrettanti momenti *clou* dell'evoluzione della vita e degli sforzi per ricostruirla (l'idea stessa che i fossili siano i resti di organismi antichi non è stata banale da raggiungere).
La prima immagine, giustamente dei «più antichi fossili del mondo», secondo alcuni non dovrebbe neanche esserci: sono filamenti microscopici fra rocce vitree australiane, interpretati da molti come fossili microbici, ma da altri come mere strie inorganiche. La saga prosegue con i primi segni certi della vita, le stromatoliti, comunità microbiche di 3,5 miliardi di anni fa, e poi con l'esperimento della fauna di Ediacara. L'esplosione di organismi nel Cambriano inaugura il Fanerozoico, l'epoca della «vita evidente», quando i suoi segni si fanno molteplici, ma proprio per questo le sue trame diventano più difficili da dipanare. Con belle foto e racconti ben scritti, il libro non è una storia esaustiva della vita ma un ricco atlante illustrato con tanti suoi capitoli. Una storia che è sempre in fieri: uno studio pubblicato da poco confermerebbe che «i più antichi fossili del mondo» hanno tutto il diritto di inaugurare il volume, perché sono davvero microrganismi.

Giovanni Sabato

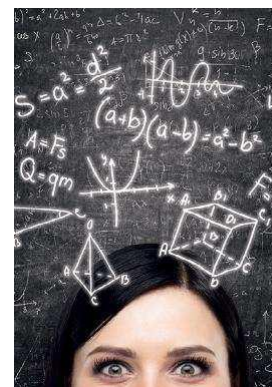
Un florilegio della botanica esotica del Settecento

Florilegium
di Joseph Banks
Einaudi, Torino, 2017, pp. 320 (euro 90,00)

Alcuni libri sono molto di più che testi da leggere. Sono volumi che possono essere considerati a tutti gli effetti degli oggetti, nella migliore accezione possibile del termine. *Florilegium* è tra questi. Il prezzo, certo, non è tra i più accessibili, ma basta sfogliare le pagine, corredate di 181 illustrazioni a colori, per sbalordire alla vista di una delle più straordinarie raccolte di stampe botaniche del Settecento.
La storia di *Florilegium* ha inizio poco dopo la metà del XVIII secolo. Era il 26 agosto 1768, e Joseph Banks, un giovane britannico, naturalista talentuoso e membro di una ricca famiglia, era appena salpato dal porto di Plymouth a bordo di un brigantino comandato da James Cook. Sarebbero tornati in patria nel 1771, e per tutti quegli anni avrebbero navigato principalmente nell'emisfero australe: tra Sud America, Oceano Pacifico, Nuova Zelanda, Australia, Nuova Guinea e Africa meridionale. Lo scopo principale della spedizione era l'osservazione dall'isola di Tahiti del transito di Venere sul Sole, ma Cook e Banks tornarono in patria con molto di più. Il comandante portò in dote alla corona britannica il dominio di buona parte dell'Australia. Il naturalista tornò a casa con oltre 1300 specie di flora esotica sconosciute in Europa.
Negli anni successivi, Banks commissionò incisioni del florilegio di piante che aveva raccolto. L'idea era pubblicare un'opera enciclopedica delle sue scoperte corredata di illustrazioni, un obiettivo raggiunto però 200 anni dopo circa. Per varie vicissitudini, solo tra il 1980 e il 1990 è stato possibile per la prima volta stampare a colori le incisioni commissionate dal giovane Banks e raccoglierle in un'opera monumentale, ora pubblicata finalmente anche in Italia.

Giovanni Spataro

Sei formule che hanno cambiato il mondo

Senza matematica non ci sarebbe scienza. Lo sapeva bene Galileo Galilei, che considerava la matematica come il linguaggio usato dalla natura. E lo sanno bene anche gli studenti, ma anche molti adulti, che troppo spesso trovano incomprensibile la matematica a causa di un timore alimentato dal pregiudizio.
Proprio per avvicinare il grande pubblico al mondo dei numeri, per il secondo anno consecutivo, la casa editrice il Mulino e la Fondazione Musica per Roma han-

no organizzato *Dialoghi Matematici*. È un appuntamento mensile all'Auditorium di Roma, pensato come un racconto della conoscenza attraverso sei formule che hanno cambiato il mondo, provando a ricostruirne la biografia: come sono nate, quali problemi hanno risolto e quali scenari hanno aperto. Il primo appuntamento c'è stato il 21 gennaio, con il teorema di Pitagora; l'11 febbraio è la volta della relatività di Einstein, raccontata da Vincenzo Barone e Arnaldo Benini; il 18 marzo Laura Catastini, Franco Ghione e Guido Tonelli, racconteranno il teorema di Gauss. I dialoghi proseguiranno ad aprile con un doppio appuntamento, per poi concludersi a maggio. Per tutte le informazioni: http://www.auditorium.com/eventi/rassegne. (*cb*)

ImageFlow/Shutterstock (*ragazza e formule matematiche*)

La fisica delle cose di ogni giorno
di James Kakalios
Torino, Einaudi, 2018,
pp. 192 (euro 17,50)

Dalla sveglia dello smartphone al televisore che concilia il sonno

«Ogni volta che viene inventato uno strumento che consente un nuovo modo di vivere, esso contemporaneamente crea un nuovo regno di ignoranza; se tutti avessero dovuto comprendere i principi della lavorazione dei metalli prima di prendere in mano un coltello, l'Età del bronzo sarebbe durata molto più a lungo».
Lo scriveva tempo fa sul «New Yorker» Elizabeth Kolbert in un lungo articolo sul rapporto tra ignoranza, conoscenza e progresso. L'ultimo libro di James Kakalios, tuttavia, va proprio contro questa tendenza: solleva il velo dell'ignoranza che ricopre gli oggetti che usiamo ogni giorno (almeno per una parte di noi) e che rendono la nostra vita assai più comoda e semplice di quella di solo di vent'anni fa.
Dopo il successo *pop* di *La fisica dei supereroi*, l'astrofisico Kakalios volge il proprio sguardo indagatore a un ambito molto più concreto, spiegando al lettore (a cui si rivolge direttamente con il «tu») come funzionano il tostapane, il telepass o il puntatore laser. Nei sette capitoli del libro, Kakalios lo accompagna in una giornata ipotetica, ma piuttosto realistica, di un consulente che vola in una città diversa dalla sua per tenere una presentazione aziendale. Per riuscire in questa semplice e prosaica impresa, tuttavia, la fisica che lo assiste in tutti i momenti è tanta. Kakalios diventa quindi una voce fuoricampo che «mette in pausa» la nostra giornata e ci porta dentro alla scienza degli oggetti quotidiani, dalla sveglia del nostro smartphone che ci dà il buongiorno fino alla televisione a schermo piatto di fronte alla quale ci addormentiamo la sera.
La fisica delle cose di ogni giorno è un libro che si legge in un baleno, perché riesce a portare alla comprensione, per esempio, dell'elettronica dello schermo *touch* senza dover far ricorso a forti dosi di matematica. Funziona in modo opposto ai libri di testo, in cui si spiega prima il principio e poi se ne dà esempio in diverse applicazioni. Kakalios parte della applicazioni per arrivare alla spiegazione del principio fisico e per questo potrà essere una risorsa per gli insegnanti. Dove delude un po' è nella prospettiva storica e nell'aneddotica. Le spiegazioni non citano, con l'eccezione di Albert Einstein e pochissimi altri, i nomi degli scienziati che hanno contribuito a una o all'altra scoperta, né si racconta quando le soluzioni tecnologiche che usiamo sono state introdotte. Il che appiattisce il racconto tra un «prima» e un «oggi» generici che, se non intaccano l'efficacia della divulgazione, danno l'impressione che il libro sia una buona pietanza un po' scarsa di sale.

Marco Boscolo

Il trucco c'è e si vede
di Beatrice Mautino
Chiarelettere, Milano, 2018,
pp. 240 (euro 15,00)

Tutti i trucchi delle aziende di cosmetici, industriali e bio

Come chiedere all'oste se il vino è buono e, spesso, senza alternative per il consumatore. Questa è la situazione attuale degli studi sui cosmetici, la maggior parte dei quali è effettuata dalle aziende produttrici, che hanno tutto l'interesse a dimostrarne l'efficacia, anche ricorrendo a indebite forzature.
È da questo peccato originale alla base dell'industria cosmetica che prende le mosse Beatrice Mautino, autrice nota ai lettori di «Le Scienze» per la rubrica *La ceretta di Occam*, che in questo libro fonde il metodo del giornalismo d'inchiesta con il tono confidenziale di una conversazione amichevole. Lo scopo è rivelare i trucchi con cui i produttori di cosmetici provano a convincerci dell'efficacia delle loro formulazioni, svelando che cosa si nasconde dietro i vari *claim*, le affermazioni sulle proprietà attribuite a un prodotto, il più delle volte altisonanti quanto vuote.
Ma se le grandi aziende mentono, non si può assolvere neppure il mondo del «naturale», del «bio», dell'«*eco-friendly*», intorno al quale si riunisce una comunità sempre più estesa che ha internet e i *social network* come mezzo di aggregazione. L'occhio critico dell'autrice vi si sofferma, rilevando indebite demonizzazioni e *claim* ugualmente ingannevoli. Esemplare il caso che vede contrapposti i parabeni e l'estratto di semi di pompelmo, in cui i primi fanno la parte del «cattivo», in quanto conservanti accusati di essere cancerogeni, e il secondo dell'alternativa «buona, pulita e giusta». Seguendo con scrupolo l'origine di queste affermazioni, l'autrice ne smonta e ribalta le conclusioni, lanciando al lettore il messaggio che le semplificazioni sono comode ma spesso errate.
Un discorso simile è alla base dell'interessante critica mossa a uno strumento idolatrato in siti web e forum eco-bio: il Biodizionario, quello, per intenderci, che divide in buoni e cattivi gli ingredienti dei cosmetici tramite l'attribuzione di bollini rossi, gialli oppure verdi come le luci di un semaforo. L'inghippo, suggerisce Mautino, sta nell'atteggiamento paternalistico alla base dell'operazione: chi assegna i bollini non fornisce motivazioni e si sostituisce, di fatto, al giudizio del consumatore, che non può fare una scelta consapevole.
È proprio su questo punto che sembra convergere l'intero discorso: la possibilità di scegliere disponendo di informazioni corrette. Un ideale difficile da realizzare perché va contro gli interessi del marketing aziendale; senza dubbio, però, la lettura di questo libro ci renderà consumatori più attenti e meno inclini a lasciarsi sedurre dall'ingrediente miracoloso di turno.

Anna Rita Longo

Galileo, la scienza e le arti

Una mostra a Padova svela i lati meno noti dello scienziato italiano che non fu solo un difensore della ragione ma anche un vero uomo del Rinascimento

Erwin Panofsky è stato uno dei più influenti storici dell'arte del Novecento. Non amava scrivere monografie, preferendo concentrarsi sulle idee e le loro relazioni con l'arte e la storia. Nel 1954 fa una rara eccezione pubblicando un volume che non è nemmeno dedicato a un artista, ma a uno scienziato: *Galileo Galilei critico delle arti*. Il fatto potrà sorprendere chi ha conosciuto Galilei prevalentemente attraverso il mito di difensore della ragione e padre del metodo scientifico. Ma lo scienziato toscano è stato molto di più: un vero uomo del Rinascimento che alcune fonti, in uno sforzo di continuità simbolica, vogliono nato lo stesso giorno della morte di Michelangelo.

Rivoluzione Galileo, la mostra ospitata al Palazzo del Monte di Pietà a Padova, la città dove lo scienziato visse «li diciotto anni migliori di tutta la mia età», va proprio nella direzione di svelare al grande pubblico lati meno noti dell'autore del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Figlio di un compositore e teorico della musica, Galileo ha ricevuto una completa educazione sia musicale sia letteraria, ed era un ottimo disegnatore. Conosceva i classici e non esitò a entrare nella discussione dell'epoca se fosse da preferire l'opera di Tasso o quella di Ariosto, che lui privilegiava. Ma, e la mostra padovana lo mette bene in evidenza, non ha avuto remore a esprimere opinioni argomentate e forti anche sul Manierismo del suo tempo, che non lo soddisfaceva.

Galileo Galilei al tribunale dell'Inquisizione in un dipinto (1857) di Cristiano Banti. Sotto, *Natura morta a inganno* (Banti, metà XVII secolo); accanto sfera dell'universo tolemaico (XVI secolo).

Cortesia Studio Esseci (*tutte le foto, 3*)

Il percorso espositivo si occupa anche dell'influenza di Galileo nell'arte successiva, che ha dovuto fare i conti con una delle sue più forti trasformazioni culturali, l'aver sottratto il cielo agli astrologi per consegnarlo agli astronomi. Un primo effetto si può scorgere nella *Fuga in Egitto* di Adam Elsheimer (1609), prima raffigurazione della Via Lattea, e via via in una sequenza di artisti che raffigurano la luna vista con il cannocchiale. Un'altra sezione si occupa anche della costruzione ottocentesca del mito di Galilei. Si parte con la Tribuna di Galileo, voluta dal Granduca Leopoldo II di Lorena e sorta di sintesi iconografica ideale della scienza sperimentale, per passare al profluvio di monumenti dedicati allo scienziato, che diviene icona al pari di Dante Alighieri, come testimoniano l'opera teatrale di Ippolito Nievo che racconta il processo e le pagine dello *Zibaldone* che Giacomo Leopardi dedica al «primo riformatore della filosofia e dello spirito umano».

Marco Boscolo

Dove & quando:
Rivoluzione Galileo. L'arte incontra la scienza
Fino al 18 marzo,
Palazzo del Monte di Pietà,
Piazza Duomo, 14
Padova
www.mostrarivoluzionegalileo.it

Dossier: il futuro del denaro

di Alexander Lipton, Alex Pentland, John Pavlus e Natalie Smolenski

Le criptovalute eliminano l'intermediazione di banche e consulenti finanziari, promettendo una distribuzione più equa delle ricchezze e una maggiore partecipazione delle persone all'economia globale. Ma se non saranno usate con attenzione potrebbero ottenere l'effetto contrario, portando a una concentrazione di potere senza precedenti nella storia.

In guerra con se stessi

di Michael Waldholz

Molti nuovi farmaci scatenano una reazione immunitaria che ne contrasta o vanifica l'azione. Una delle nuove strategie per contrastare gli anticorpi consiste nell'allenare l'organismo a tollerare i farmaci con una tecnica simile a quella dei vaccini.

L'abisso tossico della solitudine

di Francine Russo

Numerosi studi indicano un collegamento tra la solitudine e la vulnerabilità a un gran numero di malattie fisiche e psicologiche, che vanno dalla depressione al declino cognitivo ai problemi cardiocircolatori. Gli interventi destinati ad affrontare il problema hanno avuto successo quando hanno ridotto i pensieri negativi.

LE SCIENZE S.p.A.

Sede legale: Via Cristoforo Colombo 90, 00147 ROMA.

Redazione: tel. 06 49823181
Via Cristoforo Colombo 90, 00147 Roma
e-mail: redazione@lescienze.it
www.lescienze.it

Direttore responsabile
Marco Cattaneo

Redazione
Claudia Di Giorgio (*caporedattore*),
Giovanna Salvini (*caposervizio grafico*),
Andrea Mattone (*grafico*),
Cinzia Sgheri, Giovanni Spataro

Collaborazione redazionale
Folco Claudi, Gianbruno Guerrerio
Segreteria di redazione: Andrea Lignani Marchesani
Progetto grafico: Giovanna Salvini

Referente per la pubblicità
A. Manzoni & C. S.p.A.
agente Daria Orsi (tel. 02 57494475, 345 4415852)
e-mail dorsi@manzoni.it

Pubblicità:
A. Manzoni & C. S.p.A.
Via Nervesa 21, 20139, Milano, telefono: (02) 574941

Stampa
Puntoweb, Via Variante di Cancelliera, snc, 00040 Ariccia (RM).

Consiglio di amministrazione
Corrado Corradi (presidente), Michael Keith Florek (vice presidente), Gabriele Acquistapace, Markus Bossle, Stefano Mignanego

Responsabile del trattamento dati (D. lgs. 30 giugno 2003 n.196):
Marco Cattaneo

Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970.

Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p.A.
Printed in Italy - gennaio 2018

ISSN 2499-0590

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in Chief and Senior Vice President
Mariette DiChristina

President
Dean Sanderson

Executive Vice President
Michael Florek

Hanno collaborato a questo numero
Per le traduzioni: Francesca Bernardis: *Come i prigionieri hanno cambiato il mondo;* Eva Filoramo: *I due volti dell'empatia*; Elisa Dalgo: *L'ingegneria genetica può salvare le Galápagos?*; Daniele Gewurz: *Plutone svelato;* Libero Sosio: *Sulle tracce dei multiquark;* Alfredo Tutino: *Il rompicapo delle nuvole.*

ABBONAMENTI E ARRETRATI
GEDI Distribuzione S.p.A.
Casella Postale 10055 - 20111 Milano
Abbonamenti: abbonamentiscienze@somedia.it
Arretrati e prodotti opzionali: lescienzevendite@somedia.it
Ufficio abbonamenti e Servizio Grandi clienti
Tel. 0864.256266
Fax 02 26681991

Italia	
abb. annuale	€ 39,00
abb. biennale	€ 75,00
abb. triennale	€ 99,00
copia arretrata	€ 9,00
Estero	
abb. annuale Europa	€ 52,00
abb annuale Resto del Mondo	€ 79,00

Accertamento diffusione stampa certificato n. 8467 del 21/12/2017

bodnarchuk/iStock (*bitcoin*); Brian Christie Design (*folla*)